



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Determinació dels emplaçaments més adequats per a aerogeneradors flotants a la costa catalana

Treball realitzat per:  
**Oriol Vimes i Fortis**

Dirigit per:  
**Climent Molins Borrell**  
**Pau Trubat Casal**

Grau en:  
**Enginyeria d'Obres Públiques**

Barcelona, 16 de juny del 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**



## Resum

**Autor:** Oriol Vimes i Fortis

**Tutor:** Climent Molins Borrell

**Cotutor:** Pau Trubat Casal

**Paraules clau:** parc eòlic marí, SIG, selecció d'emplaçaments, aerogenerador flotant, anàlisi geoespacial multicriteri

La demanda creixent d'energies renovables no deixa de créixer, i l'energia eòlica disposa encara d'un potencial que no s'ha aprofitat encara. Restringits pel flux d'aire, l'efecte visual i la manca d'espai, els parcs eòlics estan arribant al seu límit d'implantació als emplaçaments terrestres, de manera que cal una alternativa per assegurar que aquesta font d'energia es converteixi en un substitut seriós dels combustibles fòssils i nuclears.

De la mateixa manera que es requereix portar a terme un exhaustiu estudi d'emplaçaments per trobar una zona a on els parcs eòlics terrestres provoquin el mínim d'impacte possible i la potència del vent sigui suficient per garantir la rendibilitat, els parcs eòlics marins també estan subjectes a certs determinants. Trobar un lloc adequat per instal·lar-hi aerogeneradors flotants requereix cercar un recurs eòlic mínim, encara que també és important tenir present la batimetria, la distància a la costa (per evitar alts costos derivats del cable de connexió del parc) i la litologia, entre d'altres variables.

Els emplaçaments també es troben limitats per les zones d'exclusió, com per exemple les rutes de navegació marítima, els paisatges amb gran valor visual i turístic, les zones naturals protegides, àrees de maniobres militars...

El procés de selecció ha de considerar cadascun d'aquests paràmetres, i la millor manera de superposar-los tots és fent ús d'un programa SIG<sup>1</sup>, a on els mapes es poden introduir i processar per obtenir un únic mapa d'emplaçaments adequats. Aquest mètode, anomenat anàlisi geoespacial multicriteri, és exactament el que s'ha dut a terme en aquesta tesi, centrant l'atenció a la regió marina més propera a Catalunya.

Els resultats obtinguts mostren una àrea amb gran potencial d'aprofitament energètic, prop del Cap de Creus i la Costa Brava, llocs on la potència del vent és molt elevada.

---

<sup>1</sup> Sigles de *Sistemes d'Informació Geogràfica*.

## Abstract

**Author:** Oriol Vimes i Fortis

**Tutor:** Climent Molins Borrell

**Co-tutor:** Pau Trubat Casal

**Keywords:** offshore wind farm, GIS, site selection, floating wind turbine, geo-spatial multi-criteria analysis

The increasing demand for renewable sources of energy is growing day by day, and wind energy has a lot of potential that has not been utilised yet. Constrained by wind conditions, visual effect and lack of free space, wind farms are reaching the top of their deployment in inland places, and thus an alternative to onshore wind is required in order to make this source of energy a credible substitute for fossil fuels, as well as uranium.

In the same way that a thorough placement study is needed to be carried out to find a place where onshore farms cause the minimum harm and also where wind power is enough to guarantee cost-effectiveness, offshore wind farm planning needs to consider totally different determinants. Finding a site where to deploy a floating wind farm requires to check out for a good wind resource, but also it's vital to take into account bathymetry, distance from shore (to reduce cable costs) and lithology, among other parameters.

Sites are also enclosed by some restricted areas, such as navigation routes, landscapes to be preserved, natural protected areas, military exercise areas...

Selection process has to consider each of these parameters, and the best way to overlap all of them is by using a GIS<sup>2</sup> software, where maps can be introduced into and processed to obtain a single site suitability map. This method, called geo-spatial multi-criteria analysis, is exactly what this thesis has carried out, focusing on the nearest maritime region to Catalonia.

The results obtained show a potentially profitable area near Cap de Creus and Costa Brava, where wind power is very high.

---

<sup>2</sup> Initials of *Geographic Information System*.

## Agraïments

L'elaboració d'aquesta tesi ha estat un repte constant, tant pel que fa a la matèria com per la metodologia. Aprendre a fer servir una eina com l'ArcGIS ha estat senzill, però realitzar un estudi i elaborar un document que n'expliqui els detalls, d'una manera científica i rigorosa, no ho ha estat pas tant.

Estic molt agraït a l'ajuda que m'han ofert els tutors d'aquesta tesi, en Climent Molins i en Pau Trubat, ja que aquesta ha estat molt valuosa. També el seu recolzament i comprensió, quan les coses no anaven del tot bé, han estat vitals per continuar endavant amb empena.

Pau, els teus consells han ajudat molt a fer d'aquest, un treball complet i entenedor. Moltes gràcies!

Els meus pares i la meva germana han estat també una font de motivació constant, i és quelcom que mai els deixaré d'agrair, com també els sacrificis que han fet els meus pares i m'han permès arribar fins a on sóc avui, i fins a on seré al futur.

Tanmateix, dono gràcies als amics i companys de l'Escola de Camins per tots aquests anys de bons moments, que quedaran sempre al meu record.



Resum.....	2
Abstract .....	3
Agraïments .....	4
1 Introducció .....	8
2 Objectius .....	10
3 Estat de l'art .....	11
3.1 Per què instal·lar aerogeneradors flotants?.....	11
3.2 Antecedents .....	12
3.3 Elements d'un aerogenerador flotant.....	13
3.3.1 Dispositius de flotació .....	13
3.3.2 Amarres .....	15
3.3.3 Àncores.....	16
3.4 L'energia eòlica marina a Catalunya .....	17
3.4.1 Legislació .....	17
3.4.2 Recerca i prototips .....	19
4 Metodologia .....	20
4.1 Justificació del mètode.....	20
4.2 Criteris de selecció .....	21
4.2.1 Zona d'interès de l'estudi.....	21
4.2.2 Zones d'exclusió .....	23
4.2.2.1 Cables submarins .....	23
4.2.2.2 Àrees d'ús militar.....	24
4.2.2.3 Zones naturals protegides.....	24
4.2.2.4 Llocs d'interès turístic i paisatgístic.....	25
4.2.2.5 Rutes de navegació .....	27
4.2.3 Paràmetres de selecció .....	28
4.2.3.1 Recurs eòlic .....	28
4.2.3.2 Batimetria.....	29
4.2.3.3 Litologia .....	29
4.2.3.4 Distància a la costa .....	30
4.2.3.5 Distància a punts de connexió de la xarxa elèctrica.....	30
4.2.3.6 Distància als ports .....	32
4.2.3.7 Distància a cambres hiperbàriques .....	32
4.2.3.8 Condicions d'onatge i mareas .....	33
4.2.4 Criteri d'assignació de pesos .....	33
4.2.4.1 Recurs eòlic .....	34

4.2.4.2	Batimetria.....	34
4.2.4.3	Distància a la costa.....	35
4.2.4.4	Distància a ports.....	36
4.2.4.5	Distància a cambres hiperbàriques.....	36
4.2.5	Ponderació dels paràmetres.....	37
5	Eines de càlcul.....	39
5.1	Naturalesa de les dades.....	39
5.2	Programari.....	40
5.3	Dades emprades.....	41
5.3.1	Velocitat del vent.....	41
5.3.2	Batimetria.....	42
5.3.3	Distància a la costa.....	43
5.3.4	Distància als ports.....	44
5.3.5	Distància a les cambres hiperbàriques.....	45
5.3.6	Zones naturals protegides.....	46
5.3.7	Zona d'exclusió per visibilitat.....	47
5.3.8	Línies de transport marítim.....	47
5.4	Tractament de les dades.....	48
5.4.1	Mapa de densitat de potència.....	49
5.4.2	Remostreig del mapa de batimetria.....	49
5.4.3	Reclassificació dels mapes.....	50
5.5	Resultats.....	53
6	Anàlisi de sensibilitat.....	57
6.1.1	Mètode.....	57
6.1.2	Procediment.....	57
6.1.3	Resultats.....	59
6.1.4	Conclusions quant a la sensibilitat.....	62
7	Instal·lació de parcs eòlics als emplaçaments finals.....	64
8	Conclusions.....	67
9	Bibliografia.....	68
	Apèndix - Resum del tractament de dades.....	71



## 1 Introducció

La demanda d'energia elèctrica al món creix cada cop més amb el desenvolupament accelerat de països que, fins fa uns anys, es trobaven unes passes enrere en aquests termes respecte els europeus o nord-americans, si bé poc a poc estan assolint els objectius d'industrialització i desenvolupament humà que caracteritza aquells estats considerats com els més avançats. Aquesta creixent demanda també s'explica per la transició tecnològica que molts processos industrials, alhora que certes activitats domèstiques, estan patint amb la substitució del mètode manual per sofisticades màquines i robots. També hi té molt a veure l'impuls que els darrers anys ha tingut la mobilitat elèctrica, motivat pels nivells de contaminació que el trànsit de vehicles provoca a les grans ciutats i per l'esgotament (i encariment) progressiu dels combustibles derivats del petroli.

Aquesta situació d'elevada demanda, juntament amb la necessitat de reduir les emissions contaminants que l'activitat de producció elèctrica genera, està impulsant un seguit de canvis en el model energètic que fins ara s'ha seguit. Aquests canvis passen per cercar mètodes de producció més eficients (mitjançant la investigació científica i el desenvolupament industrial), menys contaminants a tot el seu cicle de vida (que inclou des de l'extracció de les matèries primeres fins al desballestament dels elements de producció, amb una clara preferència pel reciclatge i reutilització dels materials), i capaços de satisfer la demanda ocupant la quantitat d'espai més petita possible i respectant l'entorn.

L'anomenada *transició energètica* és un procés pel qual es portarà a terme una progressiva substitució dels mètodes de producció d'electricitat actuals, contaminants, no renovables i poc eficients, per d'altres que empren fonts d'energia que no emeten directament contaminants al medi, tenen un rendiment més gran i no depenen de productes que cal extreure i que són limitats. L'energia eòlica, la solar i la mareomotriu són tres exemples de mètodes de producció elèctrica que serviran com a base d'aquesta transició, atès que porten anys implantats a diversos països amb un èxit inqüestionable; tot i tenir encara marge de millora, el seu desenvolupament és, ara mateix, bastant alt, de manera que són vàlids en aquesta transició que fa anys que es va engegar.

L'energia eòlica és una de les renovables més implantades arreu d'Europa, però la majoria de parcs són terrestres (*onshore*, en anglès); d'uns anys ençà, s'estan implantant aerogeneradors també dins el mar, on les condicions per obtenir energia són més favorables per molts motius, que s'exposen al Objectius d'aquest document.

Països com Dinamarca, Alemanya o Escòcia estan liderant la implantació de l'energia eòlica marina (anomenada *offshore* en anglès), si bé els dos primers es troben més avançats en aquesta tasca degut a la poca profunditat de les aigües a les zones més properes a la costa; a Escòcia, com també a molts altres indrets d'Europa, la batimetria suposa, a priori, un factor desfavorable per estendre parcs eòlics marins, atès que aquests s'acostumen a ancorar al llit marí directament a la base de la torre si la profunditat no supera els 50 o 60 metres. Si molt a prop de la costa s'assoleixen profunditats d'aquesta magnitud es fa molt difícil instal·lar-hi parcs eòlics ja que els costos es disparen; cal, doncs, aplicar solucions alternatives a les que s'han fet servir fins ara.

Prenent com a model una tecnologia que ja fa anys que s'aplica a la indústria de l'extracció petroliera, la de les plataformes flotants, la indústria de la producció elèctrica eòlica ha trobat una solució a l'inconvenient de la profunditat excessiva. Emprant aerogeneradors amb una torre que es recolza a una base flotant (o fins i tot sense aquesta, essent la torre mateixa l'element flotador) i ancorada al llit marí mitjançant amarres i àncores, es poden implantar parcs eòlics a zones allunyades de la costa sense que la profunditat sigui un problema.

Tot i el futur prometedor que té aquesta tecnologia a països amb una profunditat considerable prop de la costa, encara es troba en fase experimental, amb nombrosos prototips a escala real ja instal·lats que recullen dades que serviran per desenvolupar-los. Durant el 2017, però, s'instal·larà el primer parc eòlic flotant plenament operatiu del món a la costa d'Escòcia, fet que encoratja a continuar apostant per aquesta tecnologia.

A Catalunya, com a Escòcia, la profunditat del llit marí és gran ja a pocs quilòmetres de la costa, pel que no resulta viable econòmicament instal·lar aerogeneradors ancorats al mateix. La solució més recomanable és, per tant, instal·lar aerogeneradors flotants, molt més flexibles quant als condicionants tècnics. Com que aquesta és una tecnologia que es troba en desenvolupament, els centres de recerca catalans tenen un paper important a l'hora de contribuir a fer-la viable a curt o mitjà termini; de fet, un grup d'investigadors de la Universitat Politècnica de Catalunya han desenvolupat un prototip de torre flotant construïda íntegrament amb formigó pretesat, fet que representa una contribució important dins aquest camp de l'energia eòlica.

A banda dels aspectes tècnics, cal conèixer quines possibilitats hi ha d'instal·lar parcs eòlics flotants a la costa de Catalunya amb la viabilitat econòmica necessària i un impacte ambiental com més reduït millor.

## 2 Objectius

La finalitat d'aquest estudi d'emplaçaments és avaluar quina capacitat tenen les aigües de la costa de Catalunya per acollir parcs eòlics amb aerogeneradors flotants. Tenint presents les singularitats d'aquest sistema de producció d'electricitat, el mètode pretén estudiar, d'una banda, les variables que més influeixen en la determinació de la idoneïtat d'una àrea determinada per realitzar aquesta activitat en el cas que no existeixin impediments explícits; de l'altra es vol delimitar aquelles zones on existeixen condicionats (altrement anomenades zones d'exclusió) que limiten o, fins i tot, prohibeixen que s'hi instal·lin parcs eòlics.

Fent ús de les eines SIG, amb les que es pot obtenir una precisió geogràfica molt elevada, es processaran les dades pertanyents a les variables (anomenades paràmetres de selecció); essent l'objectiu final de l'estudi la confecció d'un mapa d'emplaçaments, cal que les dades emprades es trobin georeferenciades i recollides en forma de mapes. Aquests mapes, tanmateix, han de ser tractats per homogeneïtzar les seves unitats i transformar-los en mapes de puntuació, d'acord amb el valor de la variable a cada punt geogràfic. Tot combinant els mapes tractats s'obtindrà un mapa d'emplaçaments amb la puntuació associada, de forma que es podran visualitzar directament aquells més convenients per generar electricitat mitjançant aerogeneradors flotants.

## 3 Estat de l'art

### 3.1 Per què instal·lar aerogeneradors flotants?

L'energia eòlica és, de tots els mètodes de producció elèctrica considerats renovables, el que més està creixent aquests últims anys, atesa la seva rendibilitat, seguretat i una complexitat operativa relativament baixa si es compara amb, per exemple, la hidràulica. La seva eficiència depèn, però, de la qualitat del flux d'aire que travessa l'àrea d'escombratge de les pales de l'aerogenerador, essent aquest un factor molt sensible a les característiques de l'entorn.

Com a fluid en moviment, el vent presenta una capa de flux turbulent a les capes més properes a l'escorça terrestre, és a dir, que l'aire es mou en direccions i amb velocitats aleatòries, per tant és un vent inconstant i impredecible. Com que els aerogeneradors només aprofiten el vent que els arriba en un rang de direccions limitat, no es pot generar energia en aquestes condicions. A partir d'una determinada cota respecte l'escorça, però, el flux passa a ser molt més endreçat (s'anomena *flux laminar*) i permet el seu aprofitament per generar energia elèctrica.

La transició entre aquestes capes de flux s'anomena *capa límit* i la seva cota respecte l'escorça augmenta directament amb la presència d'elements pertorbadors del flux com arbres, edificis, obres civils... i per aquest motiu els parcs eòlics se situen a indrets amb pocs obstacles d'aquesta mena. La capa límit es troba a una alçada que obliga a situar el rotor d'un aerogenerador a partir de vuitanta metres de l'escorça, per garantir que aquest es troba dins la zona de flux laminar.

Lògicament, als indrets marins allunyats de la costa el vent no troba gairebé cap obstacle i, per tant, la seva velocitat és més elevada que no pas terra endins. No es pot ignorar tampoc l'impacte visual que causen els aerogeneradors en un parc terrestre i la quantitat de superfície que requereix un parc eòlic i que es podria aprofitar d'una altra forma, o bé senzillament mantenir com a espai natural inalterat.

Tots aquests motius fan que situar aerogeneradors al mar sigui una opció que cada cop rep més recolzament, encara que d'uns anys ençà alguns països del nord d'Europa, Japó i Estats Units d'Amèrica han gaudit de parcs situats en aquest indret, si bé la solució que fins ara s'ha aplicat no és vàlida necessàriament per a qualsevol altre lloc.

Quan la profunditat del fons marí supera un llindar situat als 50-60 metres els aerogeneradors tradicionals, ancorats al fons a la base de la torre, deixen de ser econòmicament competitius i els seus costos es disparen. En el cas d'indrets com Catalunya, la profunditat del llit marí cau ràpidament a pocs quilòmetres de la costa, de manera que difícilment pot ésser viable un projecte d'aquest tipus a territoris amb un litoral marí tan desfavorable. Instal·lar aerogeneradors flotants en aquests llocs pot ser la solució més recomanable, o bé l'única possible.

Encara que els aerogeneradors flotants es troben encara en una fase experimental, amb nombrosos prototips a escala real en funcionament, la recerca portada a terme fins ara està produint models molt interessants, amb una rendibilitat molt elevada i uns costos cada cop més reduïts.

Els motius principals que sostenen la ferma aposta que rep aquesta tipologia d'aerogenerador són:

- Turbines cada cop més potents, que permeten generar més energia per unitat.
- Densitat energètica<sup>3</sup> més elevada als emplaçaments que queden retirats de la costa.
- Gran quantitat de zones amb potencial que registren profunditats massa elevades (i, per tant, no aptes) per instal·lar aerogeneradors ancorats al llit marí.
- Impacte ambiental (visual bàsicament) més reduït com més lluny es trobin les turbines de la costa
- Possibilitat d'ampliar els parcs sense gaires impediments d'espai.
- Les torres es poden moure del seu emplaçament habitual i transportar al port més proper, per portar a terme tasques de manteniment.

### 3.2 Antecedents

Les estructures de fonamentació emprades als parcs marins fins ara, no presenten grans diferències amb les que es fan servir als parcs terrestres, en canvi els aerogeneradors flotants recorren a unes solucions basades en principis molt diferents. La torre que sosté la naveta es troba surant a l'aigua, i per evitar moviments no desitjats causats pel vent, l'onatge i la pròpia dinàmica de la màquina, es disposen elements d'amarratge ancorats al fons marí. Són diverses les solucions que es poden observar als nombrosos prototips que s'han desenvolupat arreu del món, però en termes generals totes es poden identificar amb una de les tres tipologies principals. A començament dels anys 70 la idea dels aerogeneradors flotants va aparèixer, però fins a mitjan dels 90 no es va començar a desenvolupar seriosament, adaptant les tipologies que coneixem ara específicament pels aerogeneradors, d'acord amb les seves característiques, ja que es basen en les que fa anys es fan servir a la indústria del petroli; el petroli és un recurs molt valuós i que cada vegada és més difícil d'obtenir, de manera que fa temps que s'han pensat sistemes per realitzar prospeccions i extraccions a zones amb grans profunditats; de fet, no és casualitat que dos dels països que més han avançat en el desenvolupament d'aquesta tecnologia, Noruega i Escòcia, tinguin una indústria d'extracció de petroli potent.

Les principals diferències, quant al seu disseny, entre les estructures per extreure petroli o gas i les que serveixen per generar electricitat s'expliquen pel fet que la indústria de les prospeccions fa ús d'estructures molt grans, però en general se n'instal·len poques unitats; la indústria eòlica, contràriament, fa servir moltes estructures a un mateix emplaçament, però aquestes són més petites si es comparen amb les de l'extracció de petroli. D'altra banda, les estructures flotants per aerogeneradors estan dissenyades per estabilitzar els moviments de rotació i translació que pateix el conjunt format per la turbina i el flotador; els moviments de rotació són més notables que en el cas de les estructures per extracció de petroli, ja que tenen una alçada considerable i una base relativament estreta que les fa esveltes.

---

<sup>3</sup> A 4.2.3.1 s'explica per què la densitat de potència és tan elevada al mar; aquest és el paràmetre de referència quan es parla de recurs eòlic, més que no pas la velocitat del vent.

El primer prototip a escala real d'aerogenerador flotant que es va instal·lar fou impulsat per *Blue H Technologies* l'any 2008; tenia una potència de 80 kW i després d'un període d'un any de proves i de recollir dades a la costa d'Itàlia, es va retirar.

S'espera que, fins l'any 2030, els parcs eòlics ancorats al llit marí siguin els més emprats a tot el món, encara que a partir de l'any 2020 la proporció començarà a tendir cap a un augment molt notable dels parcs flotants. Actualment no hi ha cap parc eòlic flotant en explotació, però hi ha nombrosos projectes a escala real en funcionament: alguns només recullen dades relatives a les condicions dinàmiques a què estan sotmesos els aerogeneradors, d'altres són proves del comportament en condicions reals de models que ja es troben en una etapa de desenvolupament molt avançada, i fins i tot alguns projectes han connectat els prototips a la xarxa elèctrica i funcionen generant electricitat (és el cas del projecte *Hywind*, a Noruega o el del *WindFloat*, a Portugal; es pot consultar la descripció d'aquests prototips a (James, et al., 2015)).

La mida dels aerogeneradors ha crescut significativament els últims anys, tant pel que fa a l'alçada de la torre com per la longitud de les pales (i de retruc també ha augmentat la potència de la turbina); l'any 2000 la potència dels aerogeneradors marins (fixats al llit marí) era de 2 MW, mentre que actualment ja s'estan fent servir turbines amb potències de 8 MW a alguns prototips. Les bases de flotació, a conseqüència d'això, han de tenir unes característiques que permetin assolir alçades de rotor més grans, alhora que empentes del vent també més elevades.

Quant als països o regions que més estan desenvolupant la tecnologia d'aerogeneradors flotants, Europa presenta el major nombre de prototips en funcionament.

### 3.3 Elements d'un aerogenerador flotant

Els aerogeneradors flotants consten dels mateixos elements mecànics que els fixos al llit marí i els situats a terra, però les diferències es troben en els elements de fonamentació o sustentació. En el cas dels aerogeneradors flotants, la turbina queda situada al seu emplaçament gràcies a les forces compensades que generen tres elements diferents, que es descriuen tot seguit.

#### 3.3.1 Dispositius de flotació

Existeixen tres tipus bàsics de sistemes de flotació, encara que molts dels prototips que s'estan provant i desenvolupant estan basats en les característiques de més d'un tipus alhora. Les descripcions i la figura que els il·lustra Figura 1 s'han extret de (Ferreño, et al., 2016), i es descriuen tot seguit:

- Equilibri per flotació distribuïda (1): sistema anomenat també *semi-submersible platform* en anglès, el seu funcionament consisteix a induir la flotació del conjunt mitjançant tres o més flotadors, que en estar separats compensen els moviments de rotació de la torre; l'excés de flotació es compensa amb l'ajuda d'amarres en forma de catenària, que estiren la base de flotació en direcció

descendent gràcies al pes propi d'aquestes. La base pot arribar a ser bastant ample per assegurar una estabilitat de moviments alta, però les àncores que fixen les amarres no han de suportar grans forces ascendents. El seu transport és molt senzill, i a més permet que, en cas de ser necessària alguna reparació, es pugui desconectar de les amarres i transportar tot el conjunt fins al port més proper per portar-la a terme.

- Equilibri per llast (2): l'element de flotació és un dipòsit vertical que s'omple amb material dens (llast) fins a un nivell determinat, fet que provoca que el centre de massa del conjunt format per la turbina i el flotador quedi sempre sota el centre de flotació, generant un comportament autoestable de la torre. Les amarres són, com al cas de la flotació distribuïda, instal·lades amb forma de catenària, però el mecanisme de compensació contraresta les translacions horitzontals, principalment. Aquest sistema, anomenat també *spar buoy*, ofereix molta estabilitat, però la part submergida del flotador acostuma a ser bastant profunda i es necessiten llits marins per sota dels 120 m des de la superfície per garantir una instal·lació adequada. Tanmateix, la seva fabricació i transport a l'emplaçament són senzilles, però en fer-se aquestes amb el flotador horitzontal, cal realitzar amb molt de compte el procés d'erecció per evitar produir esforços per als que no ha estat dissenyat.
- Equilibri per amarres tesades (3): la base de flotació és similar a la del sistema *semi-submersible*, tot i que més petita ja que no ha de compensar tant els moviments de rotació del conjunt, encara que ha de garantir una força ascensional per produir la tensió de les amarres; per la seva banda, les amarres estiren del flotador en direcció descendent, garantint l'equilibri. Se l'anomena *tension leg platform (TLP)*, i té l'inconvenient que si una o més amarres (sotmeses a tracció elevada) fallen, el conjunt es desestabilitza i pot acabar caient; pot passar el mateix si una de les àncores se surt del seu lloc o es trenca. També a causa de les elevades forces que han de resistir les àncores, aquest sistema no és apte per emplaçaments on el llit marí no és prou resistent.

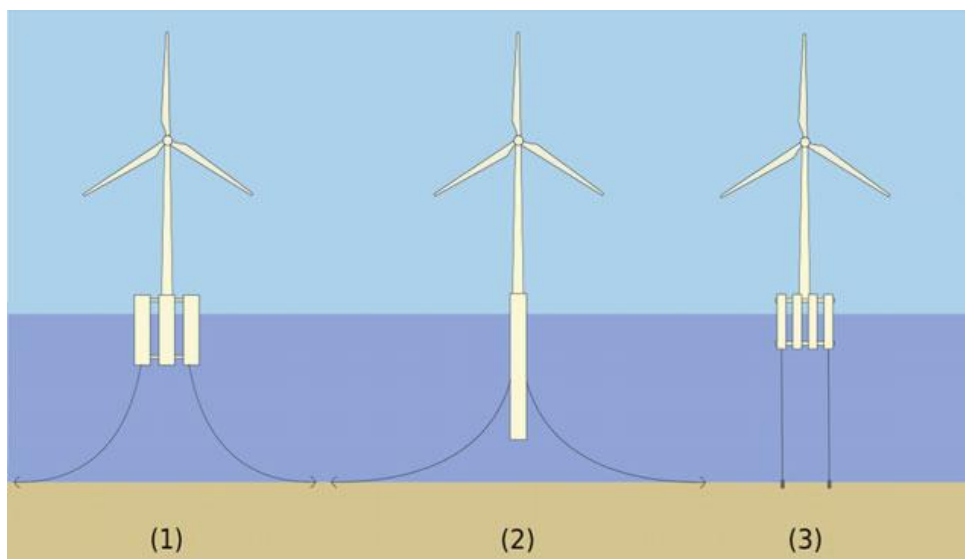


Figura 1 - Dispositius de flotació principals.

A la Taula 1 Taula 1 - Avantatges i desavantatges dels sistemes de flotació.(Ferreño, et al., 2016) es recullen, tanmateix, els avantatges i desavantatges de cadascun dels sistemes.

*Taula 1 - Avantatges i desavantatges dels sistemes de flotació.*

Tipus	Avantatges	Desavantatges
<b>Spar buoy</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disseny senzill que facilita el procés de fabricació</li> <li>• Nombre reduït de parts mòbils</li> <li>• Estabilitat excel·lent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emplaçament obligatori a aigües profundes (&gt;120 m)</li> <li>• El muntatge de la turbina requereix l'ús de grues de gran capacitat de càrrega</li> <li>• El gran calat del flotador limita les operacions de transport al port més proper per fer-hi reparacions.</li> </ul>
<b>Tension leg platform</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Massa estructural reduïda</li> <li>• Muntatge de la turbina a terra</li> <li>• Nombre reduït de parts mòbils</li> <li>• Estabilitat excel·lent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forces i tensions molt elevades a les amarres i les àncores</li> <li>• Procés d'instal·lació complex</li> <li>• De vegades és necessari l'ús de barcases fetes a mida</li> </ul>
<b>Semi-submersible platform</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicació molt flexible atesa la seva capacitat d'instal·lació a aigües poc profundes</li> <li>• No acostuma a ser necessari fer ús de grues, només de remolcadors</li> <li>• Muntatge de la turbina a terra</li> <li>• Transportable al port per fer-hi reparacions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Massa estructural elevada a causa de la superfície del flotador</li> <li>• Ús d'estructures d'acer complexes i amb moltes soldadures, que en compliquen la fabricació</li> <li>• Els sistemes de llast actiu, que poden ser necessaris, són costosos</li> </ul>

### 3.3.2 Amarres

Els dispositius de flotació, esmentats a l'apartat anterior, es troben ancorats per les amarres, que exerceixen la seva funció de compensar la flotació segons la seva disposició; en aquest sentit hi ha bàsicament dos tipus de formes, les catenàries i les tesades (Trubat, 2014).

- Amarres en catenària: es troben fixes per l'extrem inferior mitjançant àncores, mentre que a l'extrem superior s'hi troba la base de flotació. La distància que separa aquests dos punts és més curta que la longitud de l'amarra, i aquesta pel seu pes propi tendeix a fer una forma corba, de manera que no es troba en



tensió directa; si l'extrem superior tendeix a separar-se de l'inferior en direcció horitzontal, la força que s'exerceix a la base de flotació en aquesta direcció creix exponencialment (l'amarra guanya tensió en aquest cas). Les forces verticals no són gaire elevades i, per tant, les àncores poden ser menys resistents que en el cas de l'amarra tesada. La connexió amb la base de flotació es pot fer a un o bé diversos punts. Es mostra un exemple d'amarra en catenària als casos (1) i (2) de la Figura 1.

- Amarres en tensió: en estar tesades la seva longitud és més curta que la de les catenàries, i per tant ocupen menys espai. Els moviments de l'aerogenerador estan més limitats per l'efecte de les amarres, per aquest motiu quan es produeixen aquests moviments la tensió d'aquestes augmenta; en aquest sentit és convenient fer servir materials sintètics que tenen un mòdul d'elasticitat més baix i no limiten tant els moviments. Les àncores, en aquest cas, han de ser molt resistents i dissenyades per oferir una bona adherència amb el terreny del fons marí. El cas (3) de la Figura 1 és un exemple d'aquesta amarra.

### 3.3.3 Àncores

Són els elements que fixen les amarres al llit marí, i atesa la seva funció és vital que siguin resistents i tinguin bona adherència. No sempre han de resistir els esforços en la mateixa direcció i magnitud, per tant existeixen diferents tipus, que estan relacionats amb el tipus de sistema de flotació i d'amarra. Tanmateix la naturalesa del substrat present a l'emplaçament és un element determinant a l'elecció de l'ancoratge més adequat. Cal tenir present que les particularitats de cada projecte i cada emplaçament sovint recomanen l'ús d'ancoratges especialment dissenyats per aquest mateix cas. S'exposen tot seguit els quatre tipus principals, amb una breu descripció de les seves característiques i usos recomanats (James, et al., 2015); tanmateix, es mostra a la Figura 2 un esquema de cadascuna (Ferreño, et al., 2016).

- Àncora d'arrossegament (1): es tracta d'un element que es col·loca estirant-lo en contacte amb el llit marí, dins el qual queda travat el ganxo de l'àncora; la seva instal·lació és, per tant, senzilla i és recuperable. És molt eficaç per resistir esforços horitzontals, però no pas verticals. Es recomana aplicar-ho a sòls cohesius, encara que no excessivament durs ja que no es produeix una penetració adequada.
- Àncora piló (2): és una solució molt versàtil ja que per la seva forma i mecanisme de funcionament s'adapta a una gran varietat de sòls; resisteix esforços verticals i horitzontals mitjançant el fregament amb el terreny. La seva instal·lació es realitza clavant el piló o bé foradant i formigonant l'espai, mètode que és costós econòmicament i el fa recomanable en casos molt especials. També causa un gran impacte ambiental pel soroll que genera la seva instal·lació, realitzada amb martell. La seva recuperació no és senzilla i per tant és poc recomanable.
- Àncora de succió (3): consisteix a introduir un cilindre buit i obert per una de les bases, mitjançant l'aplicació d'un buit de l'aigua que hi queda dins; la pressió

hidroestàtica de l'aigua empeny la base superior i clava l'element al terreny, sempre que aquest no sigui excessivament dur ni sorrenc (no es podria extreure l'aigua de l'interior ja que es filtraria pel sòl que queda a la part inferior). Resisteix molt bé les càrregues verticals i horitzontals, i la seva instal·lació és relativament senzilla. Tanmateix es pot recuperar fàcilment si es fa el procés invers d'injectar aigua a l'interior del cilindre. És el tipus d'àncora recomanat per bases de flotació TLP.

- Àncora de gravetat (4): es pot col·locar fàcilment atès que no es clava al terreny sinó que hi reposa a sobre. Resisteix molt bé les forces verticals, encara que també les horitzontals. El mecanisme d'ancoratge és mitjançant el pes propi de l'element, de manera que és molt pesant i voluminós; això pot incrementar els costos d'instal·lació, i també dificulta molt la seva recuperació. Es requereixen sòls de duresa mitjana o alta pel seu ús.

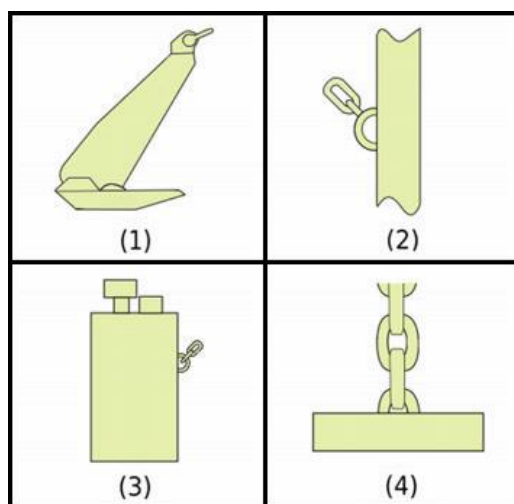


Figura 2 - Esquema dels principals tipus d'àncores

### 3.4 L'energia eòlica marina a Catalunya

#### 3.4.1 Legislació

Actualment les energies renovables a Espanya no gaudeixen d'un impuls legislatiu que permeti el seu progressiu creixement; ho demostren les dades de la mescla de producció del sistema elèctric espanyol, disponibles a (CNMC, 2017), que registren un màxim de la quota de producció mitjançant renovables del 40,6% els anys 2013 i 2014. Les condicions climàtiques de la península són molt favorables en general, i permetrien augmentar la quota de renovables notablement. Sense un entorn legal que aposti per aquest camí, és poc viable que a curt i mitjà termini hi hagi notables inversions en sistemes de producció elèctrica nets; així i tot, es porten a terme

investigacions arreu del país per millorar l'eficiència i la productivitat dels sistemes actuals, una necessitat bàsica de cara a guanyar importància dins el sistema de producció.

Amb la intenció, entre d'altres, de potenciar un canvi significatiu a les polítiques energètiques que són vigents per passar cap a un model d'energia 100% renovable i neta, el Parlament de Catalunya va aprovar a la sessió parlamentària del 28 de juliol de 2016 la Moció 57/XI sobre política energètica, que instava al Govern a presentar les bases del *Pacte Nacional per a la Transició Energètica*, que a partir del primer semestre del 2017 ha establert les bases d'una Llei de transició energètica a Catalunya.

Els objectius generals d'aquesta Llei es recullen a (ICAEN, 2016), però se'n destaquen els següents:

- *"Model energètic basat al 100% en les energies renovables desitjablement a l'horitzó 2050."*
- *"Impulsar fonamentalment les tecnologies eòlica terrestre, inclosa la minieòlica, eòlica marina i solar fotovoltaica per a la producció d'energia elèctrica mitjançant energies renovables i mantenir la generació hidroelèctrica, atenent als recursos autòctons d'energia renovable que disposa Catalunya."*
- *"Impulsar la recerca i innovació en l'àmbit de les tecnologies de generació elèctrica mitjançant energies renovables en fase de desenvolupament o ja madures."*

Amb aquesta proposta sobre la taula, és evident que un dels camps on cal més desenvolupament és el de l'energia eòlica marina, atès que Catalunya es troba clarament unes passes enrere respecte altres països europeus que han fet una aposta ferma per aquesta tecnologia. Com es comentava a l'apartat Introducció, el fons marí de les aigües més properes a la costa catalana es torna bastant profund a pocs quilòmetres de la riba, i per tant no resulta interessant instal·lar aerogeneradors fixats directament al terreny, sinó que cal fer una aposta pels aerogeneradors flotants. Aquesta circumstància, més que no pas representar un inconvenient, hauria d'esperonar a totes les parts implicades a potenciar la recerca en aquest àmbit i començar a liderar el coneixement relatiu a aquesta nova tecnologia, que es troba en un estat immadur, encara que ja prou avançat. És fonamental, doncs, que el finançament públic hi tingui un paper prou important com per, d'una banda garantir la viabilitat de les investigacions, i per l'altra atreure inversió privada que ajudi a fer realitat els projectes del futur. En aquest sentit, l'esmentat Pacte Nacional pretén fer ús de fons europeus destinats a la promoció de les energies renovables, recolzar-se en noves formes de finançament col·laboratiu i mecenatge, i a més establir impostos especials als combustibles fòssils i el nuclear.

### 3.4.2 Recerca i prototips

Existeixen al voltant d'una trentena de prototips d'aerogeneradors flotants arreu del món en desenvolupament, i un bon nombre d'ells es troben fins i tot en proves, amb models a escala real a alta mar. A l'Escola de Camins de la Universitat Politècnica de Catalunya s'ha desenvolupat un prototip de torre flotant de tipus *spar-buoy*, anomenat WindCrete (Molins, et al., 2016); es tracta d'un element que inclou el flotador i la torre tot en una mateixa peça, fabricada amb formigó posttesat per reduir la possibilitat que apareguin fissures provocades per la fatiga. L'aposta per una configuració íntegrament de formigó s'explica per la seva alta resistència i vida útil llarga si es compara amb la de l'acer, que a més pateix enormement els efectes de la salinitat de l'aigua. A més, el formigó genera un nivell d'emissions contaminants menor durant el cicle de vida de l'aerogenerador.

La profunditat del flotador permet que s'instal·li a emplaçaments amb profunditat del fons a partir de 150 m, i el mateix es fixa mitjançant cables en catenària. La turbina associada és un model de tres pales.

La Figura 3 (Molins, et al., 2016) mostra una imatge del procés d'introducció del llast al fons del flotador, fent que sigui estable a la seva posició vertical; també mostra les parts més importants de la placa d'instal·lació de la turbina.

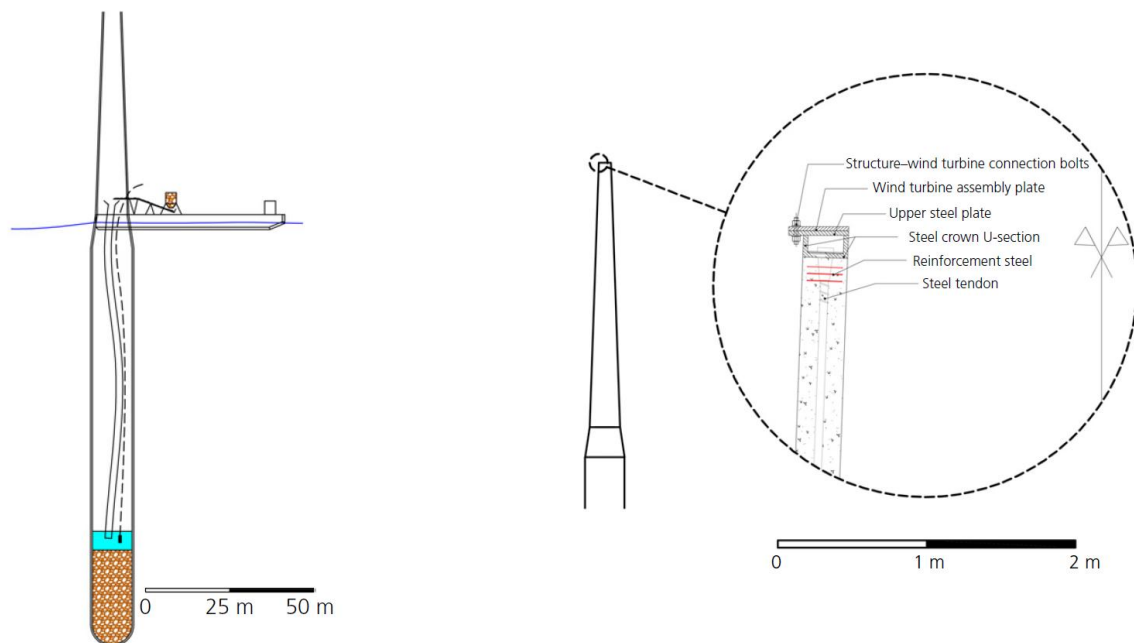


Figura 3 - Il·lustracions que mostren les característiques del WindCrete.

Es preveu que, durant el 2018, es comenci a fer proves amb un model en condicions reals.

## 4 Metodologia

### 4.1 Justificació del mètode

La selecció d'emplaçaments per als parcs eòlics respon no tan sols a criteris tècnics, sinó també als econòmics, on hi juguen un paper tant o més important que els primers. Atenent a això, el mètode més convenient de selecció seria portar a terme un exhaustiu estudi de costos en forma d'anàlisi de cicle de vida econòmic, especialment si aquest es fa comparant els parcs eòlics flotants amb els ancorats al fons marí. Aquí, però, hi trobem dues dificultats. La primera, i la més evident, és que l'estudi de costos és una tasca complexa, el resultat final de la qual no tindria una precisió que justifiqués l'esforç de processament de l'enorme quantitat de dades necessàries per realitzar-lo; seria, per tant, un mètode poc eficient (James, et al., 2015). La segona dificultat fa encara més decisiu evitar l'estudi econòmic; es tracta de que la tecnologia d'aerogeneradors flotants es troba encara en la fase experimental, fet que implica costos molt elevats de desenvolupament i perfeccionament dels prototips que es troben ja en fase de proves (cal recordar que enlloc no hi ha cap parc eòlic flotant en fase d'explotació comercial, tan sols alguns en fase de proves com es comenta a 3.2), sense esmentar que, per disposar d'una sòlida base de dades que serveixi de suport per estimar els costos, cal una sèrie històrica prou llarga (molts anys amb dades) que proporcioni consistència a l'estudi econòmic; aquesta sèrie històrica és, senzillament, inexistent en el cas dels aerogeneradors flotants, pel motiu esmentat més amunt.

Així, doncs, el mètode de selecció s'haurà de recolzar en una anàlisi geoespacial multicriteri per oferir robustesa en els resultats (Murphy et al. 2011). Cal dir, però, que indirectament aquesta metodologia de selecció té presents els criteris econòmics; un exemple d'això es troba en la variable que mesura la distància del parc a la costa, degut a que com més lluny es trobi el parc, més car sortirà instal·lar els elements i també reparar-los quan calgui. D'altra banda el fet de poder instal·lar els parcs eòlics dins un rang molt més ampli de profunditat del fons marí (cas del parcs flotants) fa que es puguin assolir vents més potents i aptes per generar electricitat; aquest fet pot incrementar-se amb la distància i és, per tant, un aspecte positiu, contràriament als costos de manteniment i instal·lació.

Sembla prou clar, per tant, que el mètode de selecció hauria d'emprar eines que permetin comparar en termes equivalents variables molt diferents, tant pel que fa a la naturalesa, com per la influència que la situació geogràfica té en el seu valor. L'anàlisi geoespacial multicriteri es pot definir com el procediment del tractament de dades georeferenciades, amb l'objectiu d'obtenir un model basat en diversos paràmetres, generals o específics del projecte, que afecten a la viabilitat d'aquest, sense perdre de vista la variable econòmica (Murphy et al. 2011). Aquest procediment es mostra més eficient a l'hora de cercar emplaçaments que no pas l'anàlisi econòmica del cicle de vida d'un parc.

L'ús dels sistemes d'informació geogràfica (amb les sigles SIG en català, GIS en anglès) permet portar a terme l'anàlisi de les dades que són rellevants de cara a situar els emplaçaments més adequats per instal·lar parcs flotants, d'una manera clara, molt visual i, sobretot, precisa, ja que es treballa amb informació georeferenciada. Aquesta informació s'organitza en el que s'anomena *model de dades espacials* (que és la forma de representar les dades de manera que les pugui interpretar l'ordinador). Els

dos principals models de dades, ràster i vectorial, es descriuen a 5.1 i necessàriament s'ha de treballar amb mapes dels dos tipus, degut a que els primers són útils per contenir dades i representar-les, i els segons per definir zones, àrees, llocs o elements.

L'anàlisi geoespacial multicriteri és, tanmateix, un complement imprescindible d'un estudi econòmic, ja que hi ha variables que tenen un cost relacionat amb conceptes com la distància que separa dos elements, per exemple. De fet, un bon estudi dels emplaçaments, que tingui un caire oficial i vinculant, ha d'incloure ambdós mètodes per assegurar que els resultats són realistes, mitjançant la compatibilitat entre allò que recomani l'estudi econòmic i el que ho faci l'estudi tècnic.

Tanmateix el mètode és molt indicat ja que permet comparar variables expressades en unitats diferents, ja que a l'hora de fer el càlcul amb totes elles el procediment consisteix a classificar-les amb puntuacions d'acord amb uns criteris i, tot seguit, sumar aquestes puntuacions. Finalment el resultat és un mapa amb la puntuació de cada zona d'acord amb la seva idoneïtat per a la instal·lació de parcs eòlics flotants.

## 4.2 Criteris de selecció

Els criteris de selecció són aquells que estableixen quines variables relacionades amb la instal·lació i explotació d'un parc eòlic intervindran en la decisió del seu emplaçament.

Situar els aerogeneradors depèn d'un conjunt de paràmetres que descriuen cadascun dels potencials emplaçaments. Certs llocs no permeten situar-hi a dins parcs eòlics o realitzar qualsevol altra activitat no permesa, ateses les seves peculiaritats o consideracions. També aquestes peculiaritats poden, senzillament, fer poc viable la instal·lació del parc o bé fer-la ideal.

No es poden establir les característiques dels emplaçaments sense abans dirigir l'estudi a una zona extensa però ben acotada del mar, que anomenem *zona d'interès*. Dins aquest espai hi trobarem àrees no aptes per a la instal·lació dels parcs, anomenades *zones d'exclusió*. A l'espai on no hi existeixin restriccions de cap tipus caldrà fer l'estudi de les característiques que el descriuen, mitjançant els *paràmetres de selecció*, que són un conjunt de variables que en conjunt fan més idonis uns espais que d'altres. Tot seguit es descriuen aquests conceptes.

### 4.2.1 Zona d'interès de l'estudi

Per començar a definir els trets més importants que caldrà tractar a l'anàlisi, primer de tot cal definir la zona d'interès de l'estudi, és a dir, l'extensió geogràfica dins la qual es buscaran els emplaçaments dels parcs eòlics. No tots els mapes representen les dades dins la mateixa extensió, i per tant s'ha de treballar amb una zona a on no hi faltin dades.

Aquesta limitació en l'extensió geogràfica representada per les dades és, en el cas del vent (principal variable amb què s'ha treballat en aquest estudi), el factor que restringeix la zona amb què es treballarà, atès que la resta de mapes emprats disposen de dades a extensions més àmplies del mar. El mapa de la velocitat del vent es mostra a la Figura 4 **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**; a les àrees representades en gris hi manquen dades, pel que aquest mapa limita l'extensió de la zona de treball a les coordenades de la Taula 2 (límits de la zona marítima amb dades de vent).

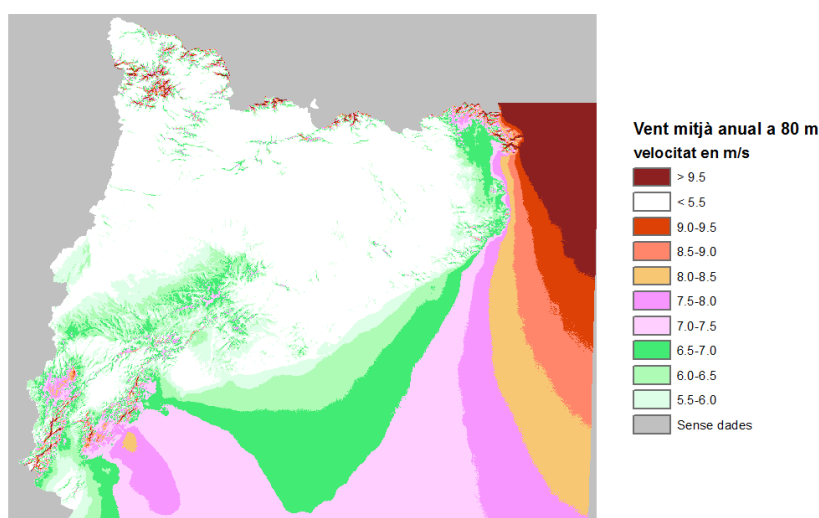


Figura 4 - Mapa de vent. La zona marítima amb dades restringeix l'estudi a aquesta zona.

Taula 2 - Límits de la zona d'estudi

Coordenades	
<b>Latitud superior</b>	42° 28' 45,247" N
<b>Latitud inferior</b>	40° 28' 43,126" N
<b>Longitud esquerra</b>	0° 29' 16,286" E
<b>Longitud dreta</b>	3° 47' 30,718" E

S'ha comprovat que la zona d'estudi queda dins el límit d'aigües jurisdiccionals; aquest límit s'ha extret de (Suárez de Vivero, 2011)

Com a criteri final, no s'ha inclòs en cap cas com a variable dins l'estudi, informació que no sigui georeferenciada, degut a que l'ús d'eines SIG perdria la seva precisió i el mètode deixaria de tenir sentit.

#### 4.2.2 Zones d'exclusió

L'entorn marítim presenta, de la mateixa manera que el terrestre, certs condicionants i restriccions que fan impossible la instal·lació de parcs eòlics a qualsevol lloc. Podem trobar condicionants de tipus natural, com per exemple zones d'interès ecològic, o bé condicionants generats per l'home, un exemple dels quals és l'existència de rutes marítimes. Es consideren com a zones d'exclusió les següents:

- Zones protegides d'interès natural
- Rutes de navegació i les seves proximitats
- Entorns d'entrada a ports i altres infraestructures marítimes
- Llocs d'interès turístic i paisatgístic
- Àrees d'ús militar i governamental
- Entorn de cables submarins

Es veurà més endavant que l'extracció de les zones d'exclusió del mapa final redueix considerablement les zones aptes per situar-hi parcs eòlics flotants.

##### 4.2.2.1 Cables submarins

A Catalunya hi ha cables submarins, dels quals no se'n difon la posició geogràfica exacta pel fet de ser elements estratègics d'elevada vulnerabilitat. Un d'ells, anomenat BARSAV, comunica Barcelona i Savona (Itàlia); l'altre es coneix com a PENBAL-5 i connecta Gavà amb Ses Covetes (Mallorca). Per aquest motiu, s'ha suposat la seva posició geogràfica a partir de la posició dels emplaçaments tal com mostra la Figura 5 (TeleGeography, 2016).

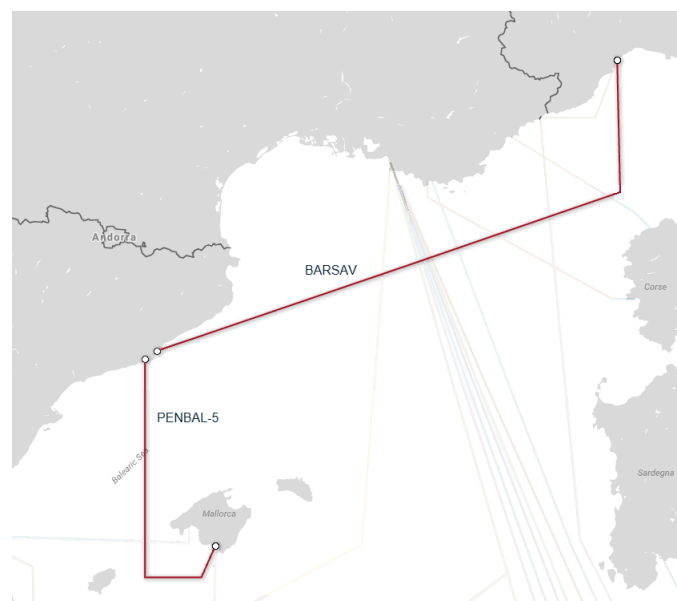


Figura 5 - Cables submarins presents a la zona d'estudi.



#### 4.2.2.2 Àrees d'ús militar

Quant a les àrees d'ús militar, s'estableix una zona d'exercicis aeronavals a pràcticament tota la zona costanera catalana d'acord amb la Figura 6 (Suárez de Vivero, 2011), tot i que no presenta zones d'exclusió i per tant no es considerarà en l'estudi d'emplaçaments.

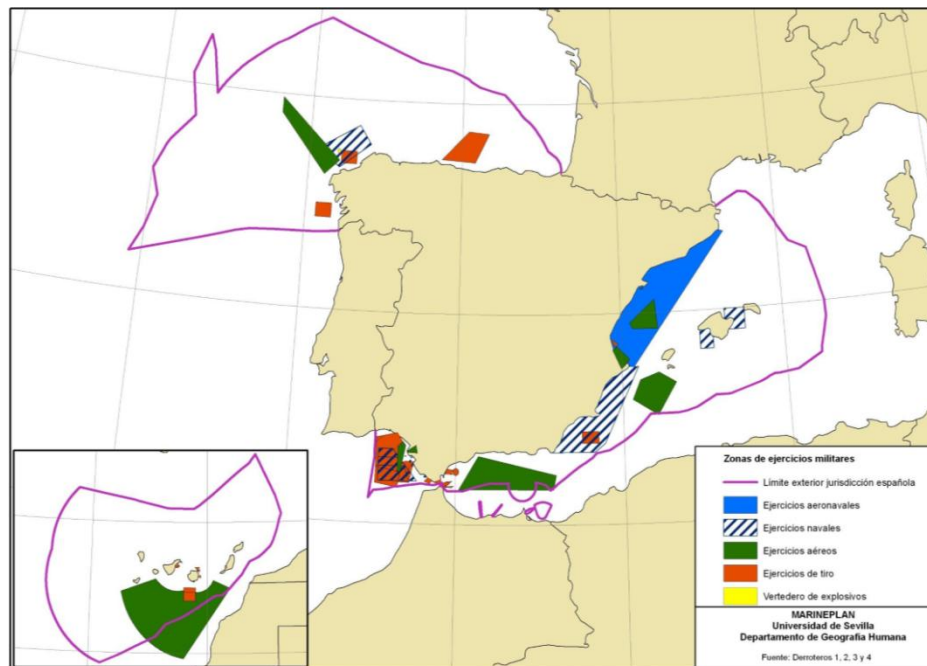


Figura 6 - Zones d'exercicis militars a la costa espanyola.

Els elements considerats com a zones d'exclusió són, finalment, quatre; es descriuen tot seguit.

#### 4.2.2.3 Zones naturals protegides

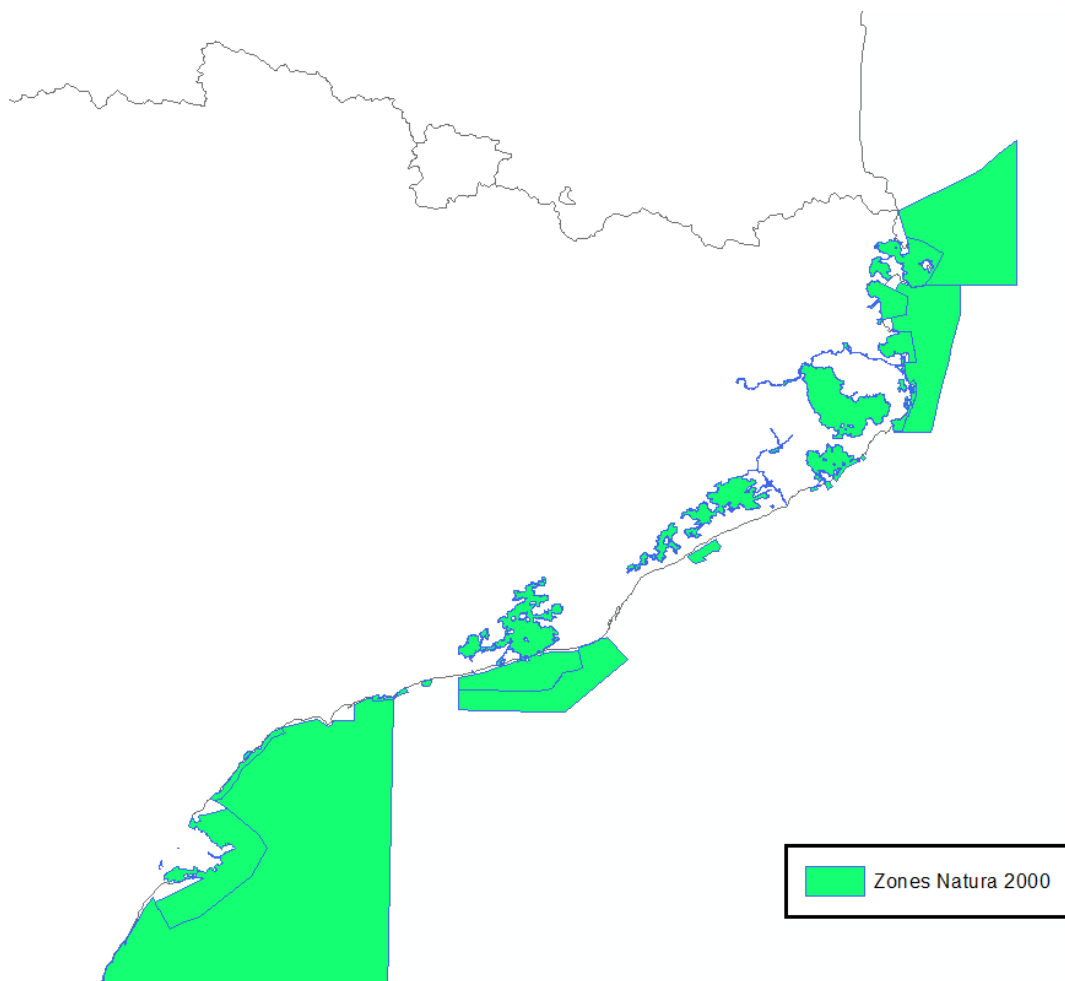
El *Mapa d'implantació ambiental de l'energia eòlica a Catalunya* aprovat pel Decret 174/2002, d'11 de juny (DTiS [1], 2013) estableix:

*"Són zones incompatibles<sup>4</sup> per a l'aprofitament eòlic: els parcs nacionals, els paratges naturals d'interès nacional i les reserves naturals integrals. També els parcs naturals aprovats o en tràmit de creació, els espais de la xarxa Natura 2000 designats com a zona d'especial protecció per a les aus*

<sup>4</sup> Segons el *Mapa d'implantació ambiental de l'energia eòlica a Catalunya*: zona incompatible és la zona del territori exclosa de la implantació de parcs eòlics on la presència de valors naturals de protecció prioritària aconsellen no fer-hi cap intervenció d'infraestructures d'aprofitament eòlic (zona vermella del mapa).

*(ZEPA) i els espais inclosos al PEIN o a la xarxa Natura 2000 designats com a lloc d'importància comunitària (LIC) de superfície relativament reduïda (< 1.000 ha)."*

Les zones protegides marines d'aquesta xarxa Figura 7 es troben principalment al Cap de Creus i l'Empordà, al nord del territori, i a la desembocadura de l'Ebre, al sud, a més d'algunes zones molt properes a la costa repartides per tot el litoral català. Les de l'Empordà i l'Ebre s'estenen, a més, uns quants quilòmetres mar endins. La cartografia emprada recull les àrees protegides que pertanyen a la xarxa Natura 2000 (EEA, 2016).



*Figura 7 - Zones pertanyents a la xarxa Natura 2000.*

#### **4.2.2.4 Llocs d'interès turístic i paisatgístic**

En aquest estudi no se'n fa cap recull, però s'ha definit una zona d'exclusió que recorre tota la costa de nord a sud, atenent al fet de no instal·lar parcs eòlics, si és possible i viable fer-ho, dins el camp de visió d'algú situat arran de mar. Aquest criteri s'ha ajustat d'acord amb la capacitat de visió de l'ull humà a gran distància, altrament

anomenada *resolució angular*, que es calcula que és de l'entorn d'1 o 2 minuts sexagesimals. Fent un senzill càlcul podem definir a quina distància deixariem de veure els aerogeneradors per a cadascun dels angles anteriors.

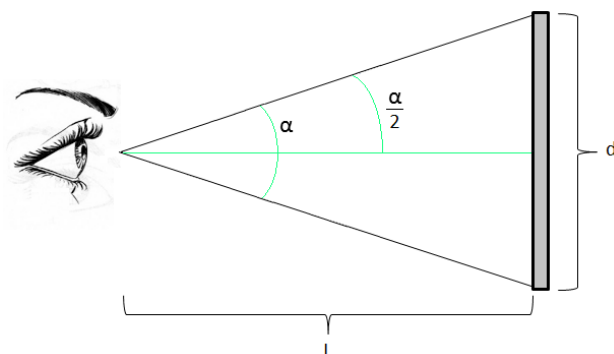


Figura 8 - Definició gràfica de la resolució angular de l'ull.

D'acord amb la Figura 8, l'ull pot mirar un objecte llunyà de longitud  $d$ , situat a una distància màxima  $L$  amb un angle  $\alpha$ , definit per la resolució angular; si la distància  $L$  augmenta o bé  $d$  es redueix, deixarà de percebre l'objecte, considerant que  $\alpha$  no canvia. És important aclarir que objectes molt esvelts, encara que tinguin longitud  $d$  i estiguin a una distància  $L$  o menor, no es podran apreciar; així, doncs, si un aerogenerador fa uns 100 m d'alçada, no és aquesta longitud la que hem de considerar com a paràmetre  $d$ , sinó l'amplada de la torre, que fa 10 metres a la base de mitjana. Per tant, la longitud  $L$  (km) per a la qual deixariem de veure els aerogeneradors d'ample  $d$  (m) es defineix per l'expressió de l'equació 1, deduïda trigonomètricament de la definició gràfica anterior.

$$L = \frac{d/2}{1000 \cdot \tan \alpha/2}$$

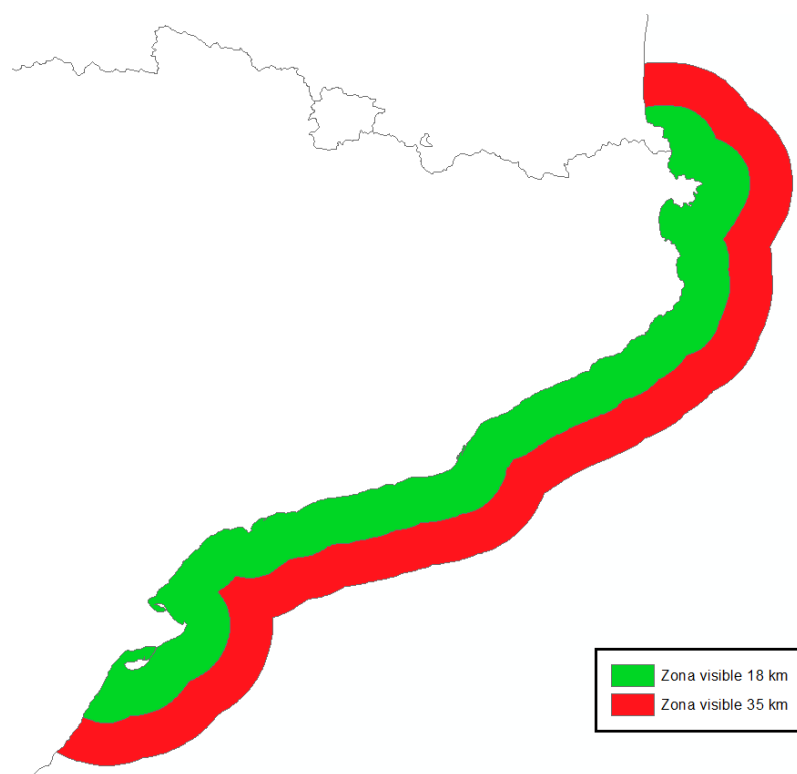
Equació 1 - Expressió per obtenir la distància de visibilitat mínima.

Així, doncs, considerant els dos límits estimats de la resolució angular de l'ull, tenim que podríem veure un aerogenerador amb 10 m d'ample a cadascuna de les distàncies que s'especifiquen a la Taula 3.

Taula 3 - Límits de visibilitat d'un aerogenerador amb 10 m d'ample.

Resolució angular	Distància de visibilitat $L$
<b>0° 1' 0"</b>	34,377 km $\approx$ 35 km
<b>0° 2' 0"</b>	17,188 km $\approx$ 18 km

Es pot observar que, en el millor dels casos (visió humana més definida), podrien veure's els aerogeneradors a 35 km de distància; per contra, en el pitjor cas (visió humana menys definida) a més de 18 km deixarien de ser percebuts.



*Figura 9 - Comparatiu entre la zona de visibilitat a 18 km i la de 35 km.*

La Figura 9 mostra la zona d'exclusió a 18 i 35 km des de la costa; s'hi pot observar que amb 35 km s'elimina una elevada superfície potencialment útil per instal·lar-hi parcs eòlics, de manera que per aquest estudi es considerarà que una resolució angular de 2' és suficient per reduir l'impacte visual.

Finalment s'ha escollit aplicar una **zona d'exclusió de 18 km** des de la línia de la costa, de manera que es garanteix que els parcs no provoquin un elevat impacte ambiental a cap lloc d'interès paisatgístic o turístic, alhora que s'eviten les entrades als ports i la resta d'infraestructures marítimes com les piscifactories.

#### **4.2.2.5 Rutes de navegació**

Es troben recollides en mapes de tipus vectorial, és a dir, que es representen com a línies, com si fossin autopistes. És necessari, degut a la incertesa de les trajectòries dels vaixells que segueixen aquestes rutes, establir al voltant de les mateixes una zona de seguretat dins la qual no hi poden situar-se parcs eòlics. Aquest límit no s'ha trobat definit amb claredat a cap normativa de navegació marítima, així que aplicant un criteri prou conservador, s'ha establert una zona de 500 m a banda i banda de cada ruta.

### 4.2.3 Paràmetres de selecció

La selecció dels emplaçaments més adequats per instal·lar-hi parcs eòlics s'ha de basar en criteris que, d'una banda s'adaptin a les característiques dels aerogeneradors flotants, i de l'altra garanteixin el mínim cost possible, tant en la instal·lació del parc com en el seu manteniment i operació. Tanmateix, s'esmenten aquells paràmetres que es consideren més rellevants per a qualsevol parc eòlic, sense definir cap tipologia d'aerogenerador en concret, ja que poden aparèixer variables més específiques d'acord a aquestes tipologies, però la influència d'aquests paràmetres en el resultat final no es considera gaire elevada.

S'enumeren tot seguit els criteris que s'han seguit a l'hora de realitzar l'estudi, així com els que s'han deixat de banda per algun motiu.

#### 4.2.3.1 Recurs eòlic

El més important de tots és, evidentment, el recurs eòlic disponible; és a dir, que els parcs eòlics han de disposar del vent suficient per garantir una producció energètica constant i situada a un nivell acceptable per garantir un retorn econòmic de la inversió. Amb els termes "vent suficient" ens referim a que hi hagi un vent amb una densitat de potència mínima, atès que no qualsevol vent és vàlid per produir energia, ja sigui per la seva velocitat, la direcció constant que pren, o la seva incidència continuada en el temps. Un aerogenerador necessita vents a partir de 6 m/s per començar a oferir rendibilitat en la producció elèctrica (Murphy et al. 2011), tot i que a l'hora de decidir quin emplaçament és més adequat per instal·lar aerogeneradors és més correcte parlar en termes de densitat de potència de l'aire, és a dir, la potència per unitat d'àrea, ja que aquesta no depèn linealment de la velocitat, sinó que ho fa al cub. L'equació 2 (IEC, 2017) mostra quina és la relació entre la potència d'un aerogenerador i la velocitat del vent incident.

$$P = 0,625 \cdot A \cdot v^3$$

*Equació 2 - Expressió de la potència del vent en funció de la velocitat*

La potència que s'obté mitjançant l'ús de l'expressió anterior s'expressa en Watt, on  $v$  és la velocitat del vent m/s,  $A$  és l'àrea de rotació de les pales en  $m^2$ . Si dividim a ambdós costats de l'equació per  $A$  obtindrem la densitat de potència de l'aire en  $W/m^2$ , de forma que sense haver de fixar un àrea de rotació, que depèn del model de turbina que es consideri, podem representar de forma molt fiable la viabilitat del recurs eòlic a cada lloc.

Tanmateix, treballar amb dades en forma de densitat de potència atorga més fiabilitat als resultats, atès que a l'expressió anterior la velocitat es troba elevada al cub i, per tant, una petita variació en la velocitat produeix un canvi significatiu en la xifra de densitat de potència.

#### 4.2.3.2 Batimetria

Els parcs d'aerogeneradors ancorats al fons marí, com ja s'ha comentat anteriorment, comencen a perdre viabilitat econòmica un cop s'assoleixen profunditats del voltant de 60 m, i per tant la tecnologia dels aerogeneradors flotants permet assolir, amb una xifra de costos menor, emplaçaments amb profunditats més elevades, de fins a 500 m actualment, però de ben segur es podrà arribar a superar aquesta xifra en el futur, quan la tecnologia s'hagi estès i desenvolupat.

Cal, doncs, un estudi acurat de la batimetria de la zona d'estudi, atès que els emplaçaments aptes per a aerogeneradors ancorats es consideren inadequats pels flotants; a més, tot i que la seva tecnologia ho permet, no és igual de viable situar-los a zones de 60 m de profunditat que a d'altres amb 500, ja que com més profunditat hi hagi, més costosa resultarà la tasca d'instal·lació, així com també ho serà la de manteniment dels ancoratges i els cables, sense passar per alt que el cost en material també es dispara.

#### 4.2.3.3 Litologia

A 3.3.3 d'aquest estudi s'hi exposen els diferents tipus d'àncores que s'empren segons el tipus de substrat present al fons marí; així, doncs, la litologia és un paràmetre fonamental en l'estudi dels emplaçaments més adequats, ja que no tots els ancoratges presenten la mateixa facilitat d'instal·lació i això suposa costos més elevats en alguns casos. S'observa que, en general, els sòls rocosos són menys desitjables que els cohesius o granulars, per la dificultat afegida en la instal·lació dels ancoratges.

Les dades litològiques són, en general, poc consistents a Europa, i es troben amb molta dificultat a alguns països, de manera que s'han impulsat projectes des de les institucions europees competents per definir una base de dades a nivell continental que contingui la litologia marina. En el cas espanyol, les dades són accessibles a través del *Visor de Información Marina* (IEO, 2016) i s'ofereix una cartografia prou completa, tot i que no s'ha realitzat el càlcul incloent-hi aquesta informació degut a què les dades no poden ser integrades en el programa de SIG, sinó només visualitzades com a Web Map Service. Dins la zona d'estudi, però, hi trobem bàsicament sòls tous, de manera que no trobaríem grans diferències en la ponderació d'aquesta variable arreu d'aquesta extensió geogràfica.

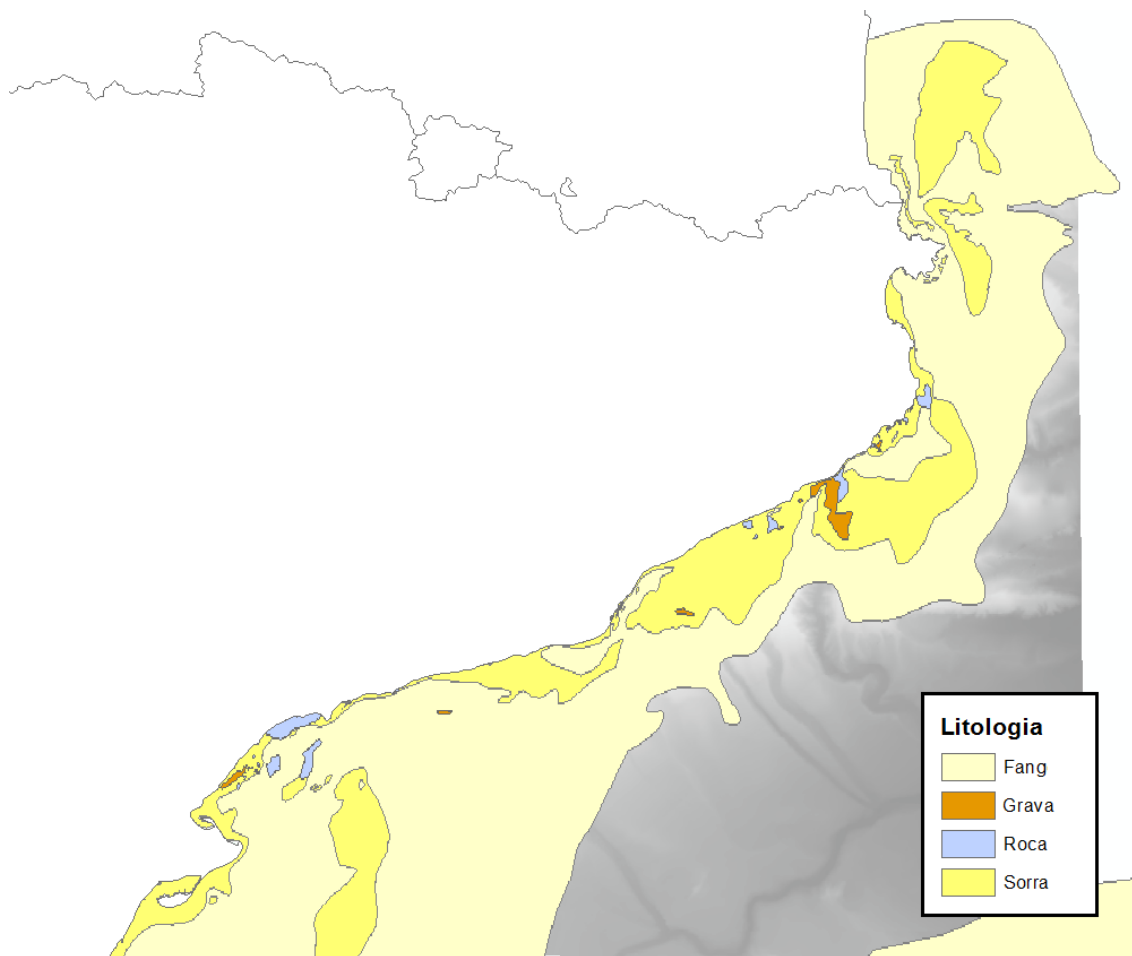


Figura 10 - Mapa de litologia visualitzat des del WMS.

#### 4.2.3.4 Distància a la costa

Els cables de connexió a la xarxa elèctrica dels parcs eòlics marins són molt costosos, degut a què, a més del preu de l'element mateix, es requereix un procés d'instal·lació complex, que inclou haver d'emprar embarcacions per dipositar-lo al fons del mar i protegir-lo. Atès això, convé limitar la distància del parc eòlic a la costa. Tanmateix convé, de cara a facilitar les operacions d'instal·lació i manteniment dels parcs, que la distància sigui mínima.

#### 4.2.3.5 Distància a punts de connexió de la xarxa elèctrica

A la literatura consultada, no es defineix clarament quina és la tensió mínima de les xarxes de connexió del parc eòlic, tot i que clarament la connexió s'ha de produir mitjançant una subestació. Tanmateix, no s'ha trobat un mapa de la xarxa elèctrica que pugui introduir-se al programa de gestió SIG, de manera que no és possible treballar amb la variable de la proximitat a la xarxa de connexió.



Tot i aquest inconvenient, parant atenció al mapa complet de la xarxa elèctrica catalana (REE, 2016), reproduït a la **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**; s'hi pot observar que els punts de connexió a la costa són abundants (punts negres), encara que molts es troben a línies de 150-220 kV (en blau).

No és senzill, però, establir quines són més adients per donar servei als parcs eòlics, ja que pot haver-hi major saturació a, per exemple, les línies de l'àrea metropolitana de Barcelona que no pas a les de la Costa Brava, tot i que les primeres són de 220 i 400 kV majoritàriament, i de 150 a 220 kV les segones.

S'ha decidit, doncs, emprar la variable de proximitat a la xarxa elèctrica de manera indirecta, integrant-la en la variable *distància a la costa*.

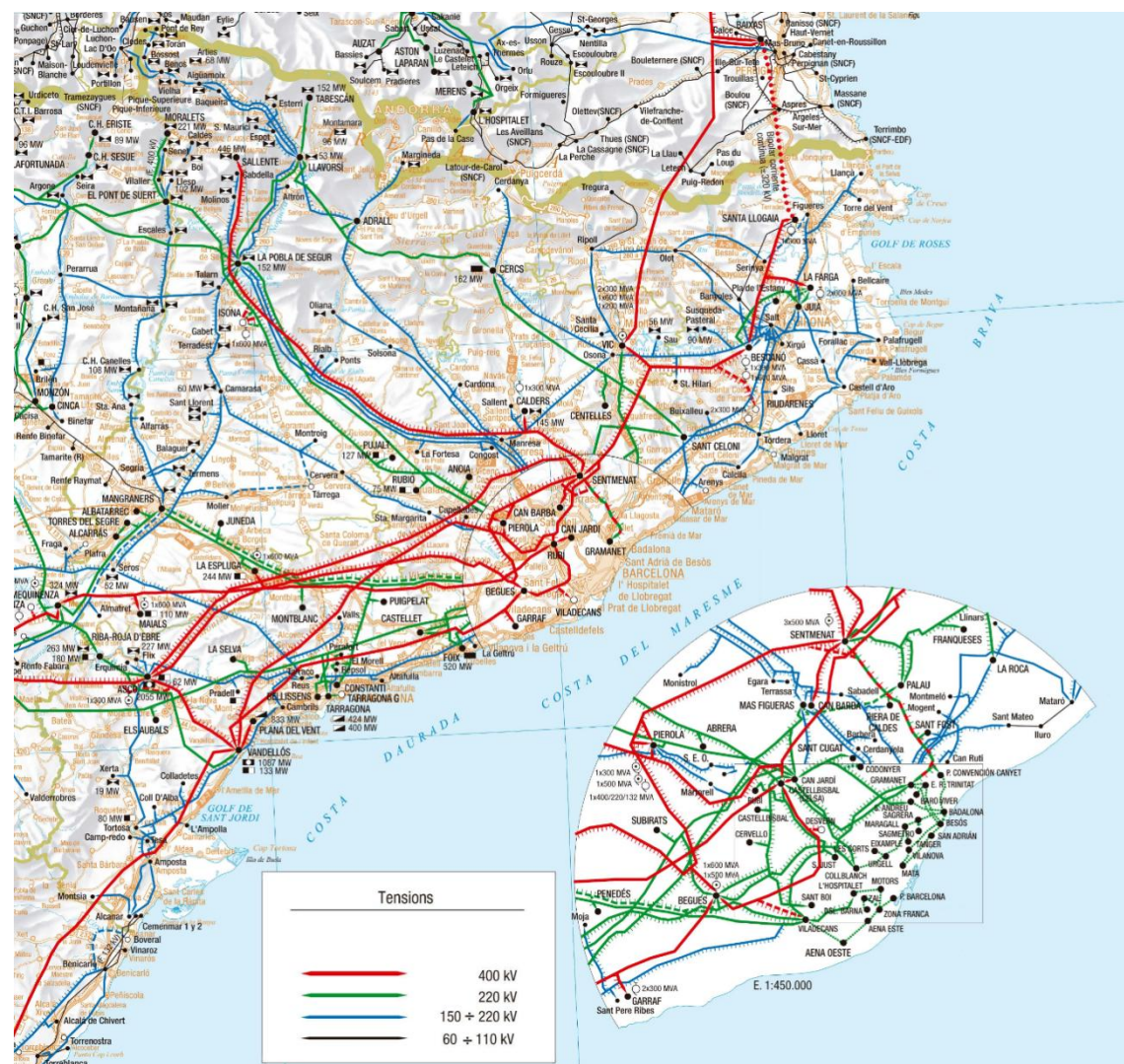


Figura 11 - Mapa de la xarxa elèctrica a Catalunya.



#### 4.2.3.6 Distància als ports

La logística de la instal·lació dels parcs eòlics es una tasca complexa que, a causa de la mida dels elements que constitueixen cadascun dels aerogeneradors, només es pot portar a terme a zones portuàries amb els mitjans adequats. No cal dir que una xarxa de transport per carretera i ferrocarril que doni servei als ports és imprescindible, tot i que hi ha factors més importants fins i tot, com la longitud dels dics del port i la seva profunditat. No s'estableix cap criteri mínim per a aquestes dues magnituds, però es considera que aquells ports que tenen una dàrsena comercial són aptes per a les tasques d'instal·lació o, com a mínim, de manteniment dels parcs eòlics.

Atenent a això, s'ha consultat al web de *Ports de la Generalitat* quins ports tenen aquest tipus de dàrsena, essent els de Palamós (Ports de la Generalitat [1], 2017), Vilanova i la Geltrú (Ports de la Generalitat [3], 2017) i Sant Carles de la Ràpita (Ports de la Generalitat [2], 2017) els únics. Naturalment, els ports de Barcelona i Tarragona també s'han de considerar en l'estudi, ja que són els que millor xarxa de transport tenen, i a més gaudeixen d'una extensa àrea que pot servir per la instal·lació de plantes d'elements prefabricats, en el cas de l'ús de torres d'aerogeneradors de formigó armat.

Les característiques dels molls dels ports de Palamós, Vilanova i Sant Carles els fan, en principi, secundaris respecte els de Tarragona i Barcelona, que són els únics a priori vàlids per gestionar elements de grans dimensions; així i tot, en aquest sentit no és senzill establir criteris sòlids, d'acord amb les característiques dels aerogeneradors i la seva instal·lació, que permetin classificar els ports segons la seva idoneïtat per portar a terme les operacions que requereix l'explotació dels parcs eòlics. Així, doncs, en aquest estudi d'emplaçaments s'han considerat aquests cinc ports amb les mateixes característiques.

#### 4.2.3.7 Distància a cambres hiperbàriques

La instal·lació i operació dels aerogeneradors requereix sempre de feines, manuals o no, que han de ser realitzades sota l'aigua; són imprescindibles, doncs, equips de bussos preparats per portar a terme les operacions que calen per unir els elements d'ancoratge a la torre.

Com a qualsevol altra activitat que involucri submarinistes, hi ha la possibilitat que es produeixin accidents per descompressió mentre duren les feines, entre d'altres riscos. És senzill trobar hospitals a prop dels emplaçaments dels parcs que puguin tractar urgències comunes, com per exemple traumatològiques, però només uns pocs disposen de les instal·lacions necessàries per tractar les embòlies gasoses que poden patir els bussos.

És important, doncs, introduir a l'anàlisi geoespacial multicriteri la variable de la distància a cambres hiperbàriques, sobretot per la distància que habitualment separa els centres hospitalaris que disposen d'aquest element, entre ells.

A la costa de Catalunya només trobem cambres hiperbàriques a l'Hospital de Palamós (SSIBE, 2010) i a l'Hospital de Sant Joan Despí Moisès Broggi (CSI, 2017), encara

que fora del territori, les de l'Hospital General Universitari de Castelló (GVA, 2017) i el centre Clinique Saint-Pierre a Perpinyà (Médipôle Partenaires, 2015) són molt properes a la zona d'estudi d'emplaçaments i per tant s'han considerat en aquest estudi.

#### 4.2.3.8 *Condicions d'onatge i mareas*

La integritat dels elements que ancoren l'aerogenerador al fons marí, així com la de l'aerogenerador mateix, està condicionada a l'onatge present a la zona on s'estén el parc; es requereix, per tant, conèixer les dades mitjanes anuals d'onatge de cara a dimensionar els ancoratges i els cables de subjecció, tot i que no és informació disponible en forma de cartografia.

Amb motiu d'aquesta falta de dades, aquest estudi no integra la variable de l'onatge en els càlculs, tot considerant que a les zones on es situaran els aerogeneradors les alçades significatives que es registren durant un any són prou homogènies i, a més, no causarien una variació de costos apreciable.

Tanmateix les mareas a la costa de Catalunya, especialment a alta mar, són molt petites.

#### 4.2.4 *Criteri d'assignació de pesos*

Tan important com una base de dades SIG completa i ajustada a les característiques del projecte, ho és el pes que tenen les dades que intervenen en el càlcul dels emplaçaments finals. Veurem més endavant, a

*Anàlisi de sensibilitat*, que aplicant criteris diferents als escollits podem alterar el resultat final de forma significativa, de manera que no tan sols el pes de cada variable és important.

Els pesos que s'han assignat a les dades d'aquest estudi s'han inspirat en les que es proposen a (Murphy, et al., 2011), encara que s'han adaptat a les particularitats de les dades que es disposen per a l'estudi a Catalunya, ja que les exposades allà són de caire general; tanmateix el paràmetre més important, el del recurs energètic, a la literatura consultada s'ha classificat afegint-hi l'onatge, atès que aquell estudi també calcula els emplaçaments més adequats per a sistemes de producció energètica mitjançant les ones.

Les puntuacions que s'atorguen a cada variable estan compreses entre el 0 i el 10, i s'atorguen en nombres parells, per fer una diferenciació més acusada de cadascuna de les classes en què s'agrupen les dades de cada variable.

Tot seguit es descriuen els criteris emprats en el repartiment dels pesos, segons cada paràmetre.

#### 4.2.4.1 Recurs eòlic

El recurs eòlic s'ha classificat atenent a la velocitat del vent, amb velocitats iguals o superiors a 9 m/s com a escenari òptim. Les zones amb velocitats entre 8 i 9 m/s són igualment molt interessants, encara que les que registren vents de 6 a 8 m/s perden capacitat de generar energia notablement (pel que s'exposa a l'apartat Recurs eòlic quant a la potència dels aerogeneradors en funció de la velocitat), si bé és en el límit dels 6 m/s que es posa en entredit la viabilitat dels emplaçaments que hi registren valors per sota i per tant han de mostrar poca rellevància en el càlcul.

D'acord amb aquesta classificació, s'exposen les puntuacions fixades a la Taula 4 - Puntuació del recurs eòlic..

*Taula 4 - Puntuació del recurs eòlic.*

Velocitat mitjana anual del vent (m/s)	Puntuació
> 9	10
8 - 9	8
6 - 8	6
< 6	2

#### 4.2.4.2 Batimetria

Amb profunditats que superen els 50-60 metres els aerogeneradors flotants tenen el potencial de ser la solució més viable econòmicament, i amb la tecnologia actual es

poden situar a zones amb profunditats de fins a -500 m, encara que en el futur podria arribar-se a superar aquest límit sense incrementar sensiblement els costos d'instal·lació i manteniment.

Amb menys de 60 m de profunditat la tecnologia flotant no es mostra competitiva econòmicament, així que es descarta implantar-la en el rang de 0 a -60 m. Considerant que la tipologia *spar-buoy* té una part submergida de més de 100 m, segons el prototip, és necessari establir un rang entre els -60 i -500 m on només hi podrien instal·lar-se torres *TLP* i *semi-submerged* (no necessiten profunditats tan altes com l'*spar-buoy*), que pot acabar, per exemple, als -150 m. A partir d'aquesta profunditat hi podria instal·lar-se amb seguretat una torre com la del projecte *WindCrete* (Molins, et al., 2016).

Com que el rang entre -150 i 500 és encara ampli, es defineix un nou límit a -200 m, a partir del qual comencen a créixer les dificultats d'operació (i per tant s'incrementen els costos).

Atenent a aquests criteris es presenta tot seguit la puntuació escollida a la Taula 5.

*Taula 5 - Puntuació de la batimetria*

Profunditat (m)	Puntuació
> 500	4
200 - 500	8
150 - 200	10
60 - 150	6
< 60	0

#### 4.2.4.3 Distància a la costa

S'ha comentat amb anterioritat que interessa instal·lar els parcs el més a prop possible de la costa per reduir els costos d'instal·lació i manteniment, per tant aquest factor serà penalitzat de forma directament proporcional.

Dins la zona d'estudi el rang de distàncies acaba poc després dels 150 km (veure Figura 16 - Mapa ràster de distància a la costa.); tanmateix cal recordar que preferentment no s'instal·larà cap parc a menys de 18 km de la costa, motiu pel qual s'ha definit una zona d'exclusió amb aquest ample. Així i tot, la puntuació escollida permet, encara que penalitzant molt, la instal·lació de parcs en aquesta àrea (caldria, llavors, plantejar noves zones d'exclusió, com per exemple les zones properes a entrades a ports).

Les puntuacions s'han assignat a les dades agrupades en classes de rang 50 km; aquestes es mostren a la Taula 6

Taula 6 - Puntuació de la distància a la costa.

Distància (km)	Puntuació
>150	4
100 - 150	6
50 - 100	8
18 - 50	10
< 18	2

#### 4.2.4.4 Distància a ports

En aquesta variable el criteri seguit per establir la puntuació ha estat molt semblant al de *Distància a la costa*, prioritzant que l'emplaçament quedi al més a prop possible dels ports, de manera que es redueixin els costos en transport de material i personal. La màxima distància que hi ha a un port dins la zona d'estudi és de 160,38 km, d'acord amb la Figura 17 - Mapa ràster de distància als ports i mapa vectorial dels ports considerats a l'estudi..

Novament les dades s'han agrupat en classes amb un rang de 50 km, excepte les dues primeres. A la Taula 7 es mostra el criteri de puntuacions.

Taula 7 - Puntuació de la distància a ports.

Distància (km)	Puntuació
>150	2
100 - 150	4
50 - 100	6
20 - 50	8
< 20	10

#### 4.2.4.5 Distància a cambres hiperbàriques

Les puntuacions que s'atorguen en aquest cas són les mateixes que a *Distància a ports*, atès que les condicions són molt semblants, així com també ho és la distància màxima a una cambra hiperbàrica registrada a la zona d'estudi, de 161,96 km segons s'observa a la Figura 18 - Mapa de distància a les cambres hiperbàriques i mapa vectorial que conté els hospitals amb instal·lacions d'aquest tipus.. Les puntuacions es recullen a la Taula 8

Taula 8 - Puntuació de la distància a cambres hiperbàriques.

Distància (km)	Puntuació
>150	2
100 - 150	4
50 - 100	6
20 - 50	8
< 20	10

#### 4.2.5 Ponderació dels paràmetres

Les variables que cal ponderar són només aquelles que hem definit com a *Paràmetres de selecció*, atès que les zones d'exclusió no intervenen en absolut en el càlcul, sinó que el restringeixen a unes zones determinades; aquestes zones són, per tant, condicions de contorn.

La ponderació es fa tenint present que la variable principal és el recurs eòlic, amb una importància sensiblement major que la de la resta; si no hi ha una potència del vent suficient, la instal·lació del parc eòlic pot resultar fàcilment inviable.

La batimetria també és un factor important, i, tot i haver solucions adaptades a profunditats diferents, els costos poden pujar notablement segons quina sigui la tipologia de torre i amarres.

D'altra banda la distància a la costa té aproximadament la mateixa influència que la batimetria; aquest factor reflexa de forma bastant fidel quina serà la longitud del cable de connexió entre el parc i la xarxa elèctrica. Aquests tipus de cables són molt costosos i, per tant, cal escollir emplaçaments propers a la costa sempre que sigui possible, de cara a reduir els costos d'instal·lació dels parcs.

La distància als ports és un aspecte menys rellevant que els esmentats fins ara, atès que poc sovint calen operacions de manteniment; sí és cert, però, que els costos de transport durant la instal·lació del parc estan influenciats per aquesta variable, tot i que cal tenir present que la variable "distància a la costa" per sí mateixa ja limita, en direcció perpendicular a la costa, la distància que separa el parc dels ports. En direcció paral·lela a la costa pràcticament totes les zones tenen un port aproximadament a 60 km de mitjana (si ens fixem en aquelles que queden fora de la zona d'exclusió per visibilitat).

Quant a la distància a les cambres hiperbàriques, la importància és també moderada, atès que en cas que es produís un accident de descompressió, l'evacuació dels ferits es faria amb helicòpter, de manera que una distància més gran entre el parc i el centre sanitari es pot recórrer ràpidament i en no gaire més temps que una de més petita. Tanmateix, de la mateixa manera que en la distància als ports, la distància a la costa limita la possibilitat que el parc es construeixi sensiblement lluny dels centres sanitaris.

Atenent a aquest ordre d'importància de les variables que s'han considerat a l'estudi, es proposa que la ponderació final es distribueixi així:

$$0,4 \cdot C1 + 0,2 \cdot C2 + 0,2 \cdot C3 + 0,1 \cdot C4 + 0,1 \cdot C5 = 1$$

*Equació 3 - Fórmula ponderada del càlcul d'emplaçaments finals.*

Les correspondències entre variables i coeficients es recullen a la Taula 9.

*Taula 9 - Relació de paràmetres i variables*

Coeficient	Variable
<b>C1</b>	Vent
<b>C2</b>	Batimetria
<b>C3</b>	Dist. a la costa
<b>C4</b>	Dist. als ports
<b>C5</b>	Dist. a les cambres

L'anàlisi de sensibilitat que s'ha fet i que es detalla a l'apartat 6, posa en relleu que l'elecció dels coeficients de ponderació és un pas determinant en el resultat final.

## 5 Eines de càlcul

### 5.1 Naturalesa de les dades

Per portar a terme l'anàlisi geoespacial multicriteri, és imprescindible l'ús de programes que puguin interpretar les dades georeferenciades i treballar amb elles, ja que no totes es troben en el mateix format. Hi ha moltes característiques que fan que els mapes necessaris per dur a terme l'anàlisi multicriteri no siguin iguals entre ells; això és degut a què la informació que contenen requereix un tractament diferent. Per exemple, un mapa de municipis no conté informació de cap variable, tan sols és un conjunt d'àrees amb informació toponímica associada; d'altra banda el mapa de vent de la **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** conté una variable, la velocitat mitjana del vent, per a cada punt geogràfic que s'hi representa.

Aquestes estructures de dades tan diferents es coneixen amb el nom de *models de dades*, i per portar a terme aquest estudi se n'han emprat dos tipus, els més habituals, que es descriuen tot seguit (Comas, et al., 1993):

- **Model ràster**, que té com a aplicació més útil la representació de les propietats de l'espai. La seva estructura bàsica és una graella formada per elements anomenats *píxels*, cadascun dels quals conté un o més valors corresponents a les dades que representa el model. No serveix per representar elements amb gran precisió, però sí qualsevol informació que els descriu; es poden fer operacions matemàtiques amb les dades que contenen i generar nous mapes temàtics.
- **Model vectorial**, amb una estructura basada en entitats que descriuen amb precisió l'espai o els elements que hi ha continguts en aquest, mitjançant objectes geomètrics; aquests objectes són de tres tipus, *punts*, *línies* i *polígons*. Té la característica (no aplicable al model ràster) de poder establir relacions topològiques entre els elements, com per exemple la proximitat o la inclusió. Tanmateix es pot consultar la taula d'atributs de la capa (Figura 12**Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**), que recull un llistat de les entitats contingudes dins el mapa amb tota la informació que tenen associada.

Degut a què l'anàlisi que es vol dur a terme consisteix a establir les àrees més indicades per instal·lar-hi parcs eòlics, necessàriament les dades que representen les variables (Paràmetres de selecció) han de proporcionar-se en forma de mapes ràster, ja que a qualsevol punt geogràfic de la Zona d'interès de l'estudi hi calen dades, per assegurar resultats precisos.

Tanmateix la graella està caracteritzada per una mida de píxel (*cellsize* en anglès) determinada, i és convenient que tots els mapes tinguin la mateixa; aquest concepte descriu la distància real que representa cada píxel.

En el cas de les zones d'exclusió, cadascuna d'elles es representa com una àrea sense dades, és a dir, un contorn; amb aquestes característiques el més adient és treballar amb mapes vectorials, on les zones d'exclusió es modelen com a polígons.



També hi ha elements, com la línia de la costa, que es representen com a línies, i d'altres, com els ports, mitjançant punts.

FID	Shape	AREA	NOM MUNI	CODI INE	NOMCOM
0	Polygon	17671048	Bausen	25045	Val d'Aran
1	Polygon	48498908	Canejan	25063	Val d'Aran
2	Polygon	23486024	Les	25121	Val d'Aran
3	Polygon	55868608	Naut Aran	25025	Val d'Aran
4	Polygon	28020120	Bossost	25059	Val d'Aran
5	Polygon	11914304	Vielha e Mijaran	25243	Val d'Aran
6	Polygon	14513810	Vilamòs	25247	Val d'Aran
7	Polygon	17701104	Alt Aneu	25024	Pallars Sobirà
8	Polygon	11660583	Arres	25031	Val d'Aran
9	Polygon	20344152	es Bòrdes	25057	Val d'Aran
10	Polygon	848664,063	es Bòrdes	25057	Val d'Aran
11	Polygon	1061135,375	Vilamòs	25247	Val d'Aran
12	Polygon	47177296	Lladorre	25123	Pallars Sobirà
13	Polygon	8813424	la Guingueta d'Aneu	25903	Pallars Sobirà
14	Polygon	82650096	Alins	25017	Pallars Sobirà
15	Polygon	55918960	Val de Cardós	25901	Pallars Sobirà
16	Polygon	8534563	Esterni d'Aneu	25086	Pallars Sobirà
17	Polygon	20124704	Val de Boí	25043	Alta Ribagorça
18	Polygon	58688640	Vilaller	25245	Alta Ribagorça
19	Polygon	96824360	Espot	25082	Pallars Sobirà
20	Polygon	16531816	Esterni de Cardós	25087	Pallars Sobirà
21	Polygon	65469888	la Torre de Cabdella	25227	Pallars Jussà
22	Polygon	70247104	les Valls de Valira	25239	Alt Urgell
23	Polygon	68280448	Llavorsí	25126	Pallars Sobirà

Figura 12 - Taula d'atributs d'un mapa vectorial de municipis de Catalunya

A Dades emprades es descriuran els tipus de dades que s'han emprat a l'anàlisi geoespacial multicriteri, atenent a quin model dels descrits anteriorment pertanyen i les seves característiques.

## 5.2 Programari

Ja que s'ha de treballar amb mapes ràster i vectorials alhora, es fa necessari l'ús d'un programa que permeti treballar amb ambdós models, així com permetre una interrelació de la informació que contenen. En l'estudi que es descriu en aquesta tesi, s'ha emprat el programa ArcGIS, compost de diferents mòduls que tenen diferents funcions, de manera que treballar amb les dades es fa més senzill, ja que les eines i funcions es troben organitzades.

El mòdul principal de l'ArcGIS s'anomena ArcMap, que és la interfície des de la qual es poden introduir mapes i treballar amb ells, visualitzar-los, visualitzar les dades que contenen, realitzar operacions topològiques (model vectorial) o, entre moltes més funcions, introduir noves dades. Les dades que es poden visualitzar a l'ArcMap poden estar en diferents formats, i fins i tot es poden consultar mapes online, tot carregant enllaços dels anomenats Web Map Service. Moltes institucions i organitzacions faciliten l'accés a les seves dades geogràfiques exclusivament mitjançant aquest servei, fet que per al propòsit d'aquesta tesi ha resultat negatiu, ja que els mapes visualitzats per WMS no permeten l'ús de les dades que contenen, tan sols la seva consulta i superposició visual amb d'altres mapes carregats.

L'altre mòdul principal de l'ArcGIS és l'ArcToolbox, que conté totes les eines de càlcul i processament dels mapes, i es fa imprescindible per arribar a obtenir un mapa d'emplaçaments per parcs eòlics partint de les dades descarregades. La Figura 13 mostra una captura del programa ArcMap, amb un mapa vectorial i un de ràster.

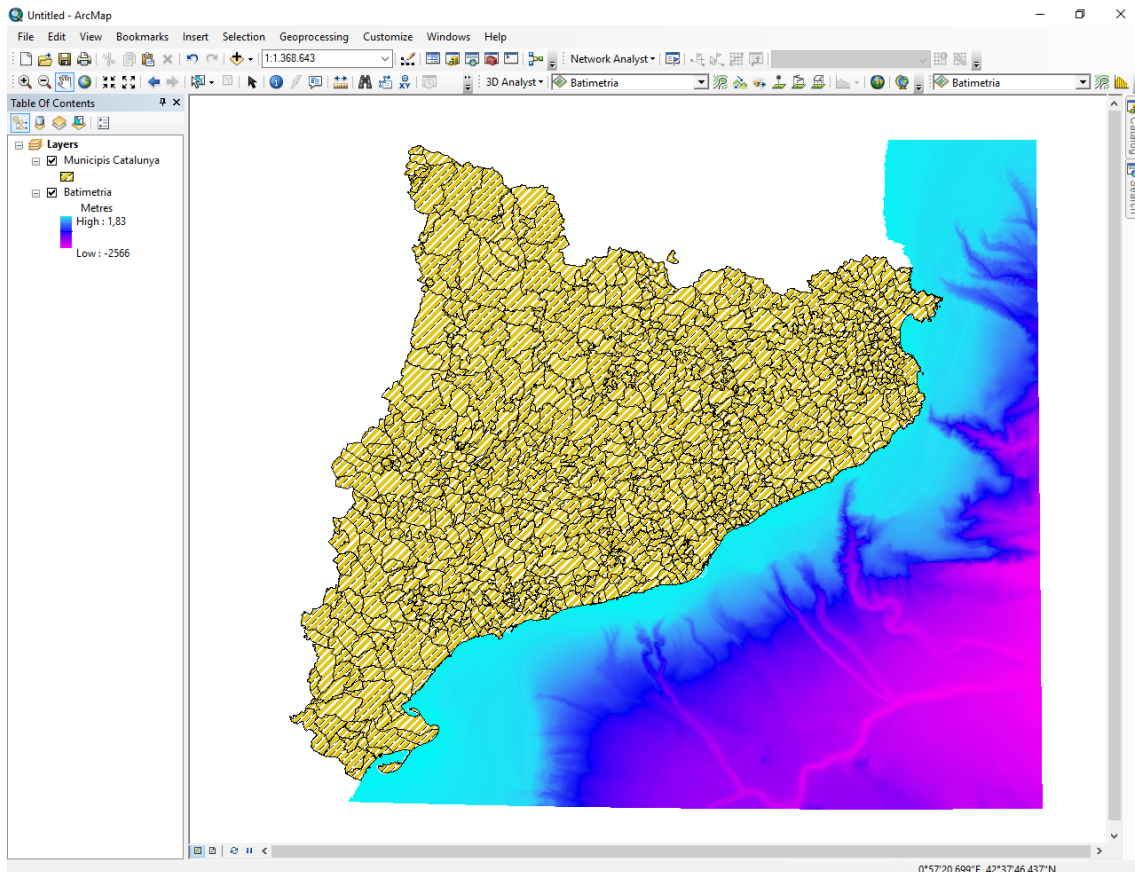


Figura 13 - Captura de l'ArcMap mostrant un mapa vectorial de municipis de Catalunya i un de ràster de batimetria.

### 5.3 Dades emprades

Tot seguit es descriuen les dades emprades en el càlcul dels emplaçaments, indicant algunes de les seves característiques i el seu origen, així com l'obtenció de les mateixes.

#### 5.3.1 Velocitat del vent

El Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya ofereix, al seu web (DTiS [2], 2010), una base cartogràfica georeferenciada amb les dades de la velocitat mitjana anual del vent a 80 m d'alçada (es mostra a la Figura 14; aquestes són les dades disponibles més aproximades, i, tot i no ser les més adients per portar a

terme l'estudi d'emplaçaments pels motius que s'exposen a 5.4.1, es consideren com a vàlides per a representar el recurs eòlic en aquest estudi.

La base s'ha descarregat en format .gif, amb els arxius de metadades associats corresponents. La resolució espacial<sup>5</sup> és de 200x200 m i el sistema cartogràfic de referència és l'UTM zona 31 Nord, amb datum ETRS89.

D'altra banda els valors de vent que inclou la base s'han obtingut de forma experimental a partir de models numèrics, de manera que la precisió de les dades no es pot garantir; per aquest motiu, els valors de velocitat es representen en forma de classes, en comptes fer-ho com a dades contínues. De nou, aquest fet limita la precisió dels càlculs que es porten a terme a l'estudi d'emplaçaments.

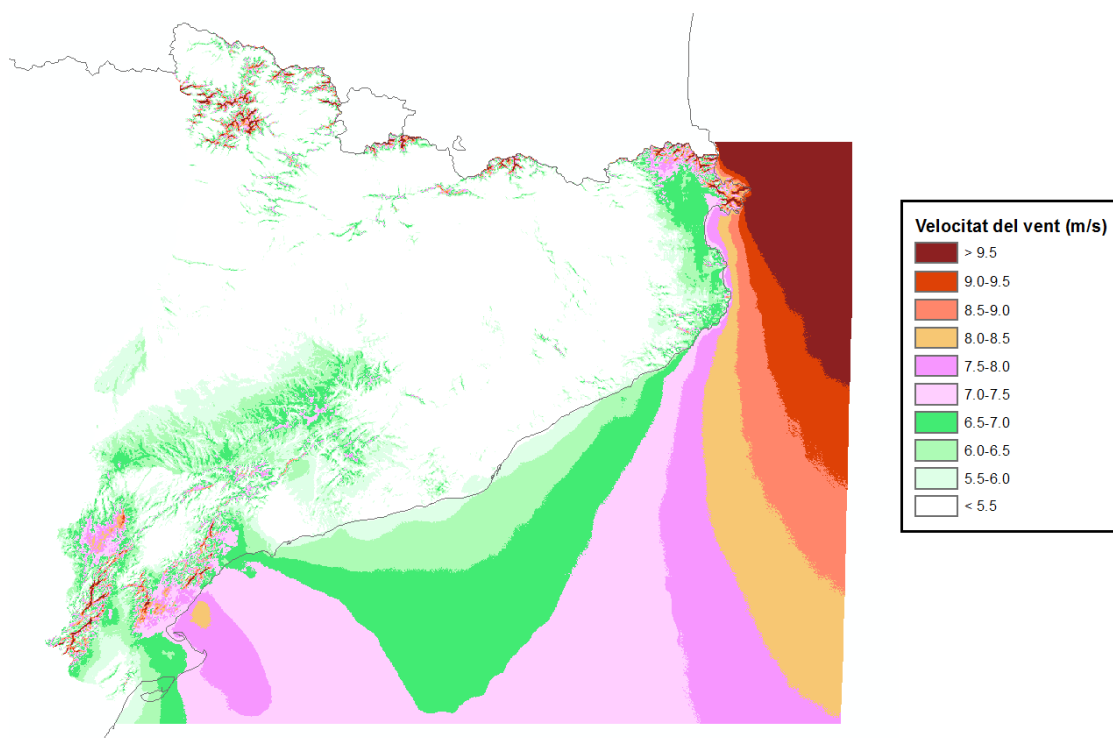


Figura 14 - Mapa de la velocitat mitjana anual a 80 m. Pot observar-se que a la llegenda les dades són contínues.

### 5.3.2 Batimetria

Diversos organismes i entitats europeus relacionats amb les ciències del mar, des de centres d'investigació i empreses fins a departaments governamentals i militars, col·laboren en la gestió del portal *EMODnet Bathymetry* (EMODnet Bathymetry, 2009), que té l'objectiu de proporcionar dades acurades sobre la batimetria dels mars i oceans dins l'àmbit europeu; s'hi poden trobar conjunts de dades georeferenciades i models digitals del terreny marítims, que es poden descarregar en diversos formats, fet que facilita la seva integració dins els programes SIG.

<sup>5</sup> És la mida a escala real que representa un píxel. Una resolució espacial de 200x200 és representatiu d'una porció de terreny de 200 metres de costat.

Les dades contingudes dins aquest servei corresponen a models digitals del terreny (MDT) generats a partir del processament de les dades obtingudes a diferents aixecament topogràfics. Els mapes tenen una resolució espacial d'una vuitena part d'un minut d'arc, és adir, que les cel·les representen distàncies de 230 metres en ambdues direccions (x, y). Tanmateix el sistema de referència en què es troba el mapa és WGS84. Com que la resta de mapes emprats té una resolució espacial de 200 m, cal fer una conversió per ajustar el mapa a aquesta xifra.

L'organització en fulls dels mapes permet una descàrrega de la zona d'interès amb el mínim de pes imprescindible, atès que les dades ràster acostumen a ocupar molt espai. Les dades que representen la zona d'estudi estan contingudes dins els fulls B3 i C3, i s'han descarregat ambdós en format ESRI ASCII. Es mostren aquests fulls a la Figura 15.

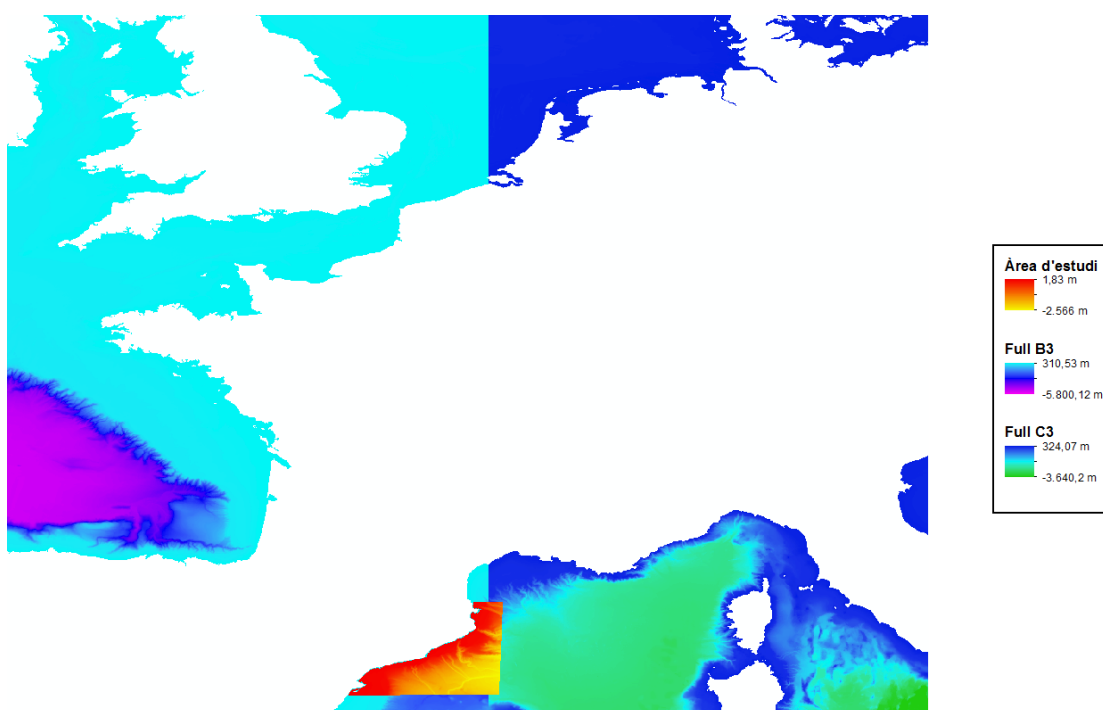


Figura 15 - Captura d'ArcMap on es representen els fulls B3 i C3 del mapa de batimetria extret d'EMODnet. L'àrea d'estudi considerada (groc-vermell) comprèn zones incloses a ambdós fulls.

### 5.3.3 Distància a la costa

Per introduir aquesta variable a l'anàlisi geoespacial multicriteri cal disposar d'un mapa ràster que representi, a cada píxel, la dada de la distància que separa el punt representat per aquest mateix píxel i el punt de la costa més proper. El pas més senzill per obtenir un mapa d'aquest tipus és generar-lo amb les eines disponibles a l'ArcToolbox, a partir d'un mapa vectorial que contingui la línia de la costa catalana. Aquest mapa vectorial d'origen s'ha extret del *EuroGlobalMap* (National Mapping,

Cadastre & Land Registry Authorities in Europe, 2016), un mapa de tipus *shapefile*<sup>6</sup> que conté diferents mapes vectorials de transport, geografia, toponímia, divisions administratives... El mapa emprat es troba referenciat segons el datum ETRS89.

Es poden ajustar els paràmetres necessaris abans que es generi el mapa (Figura 16), de manera que s'ha fixat una resolució espacial de 200x200 m, que coincideix amb la del mapa de velocitat de vent.

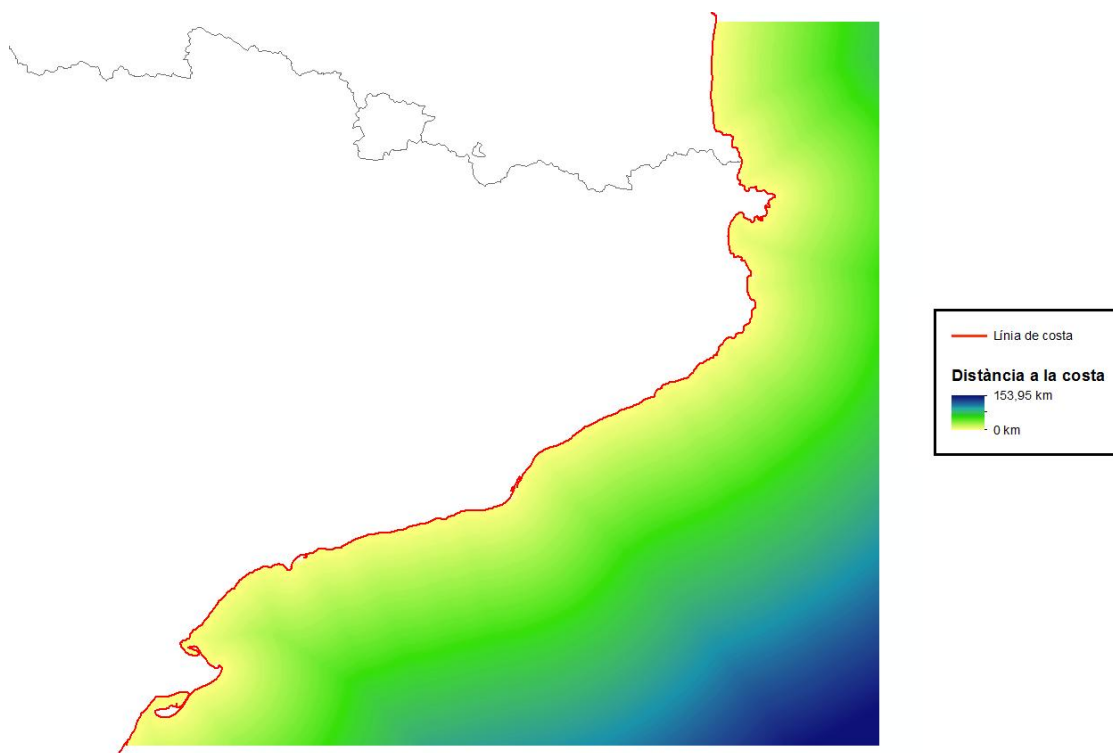


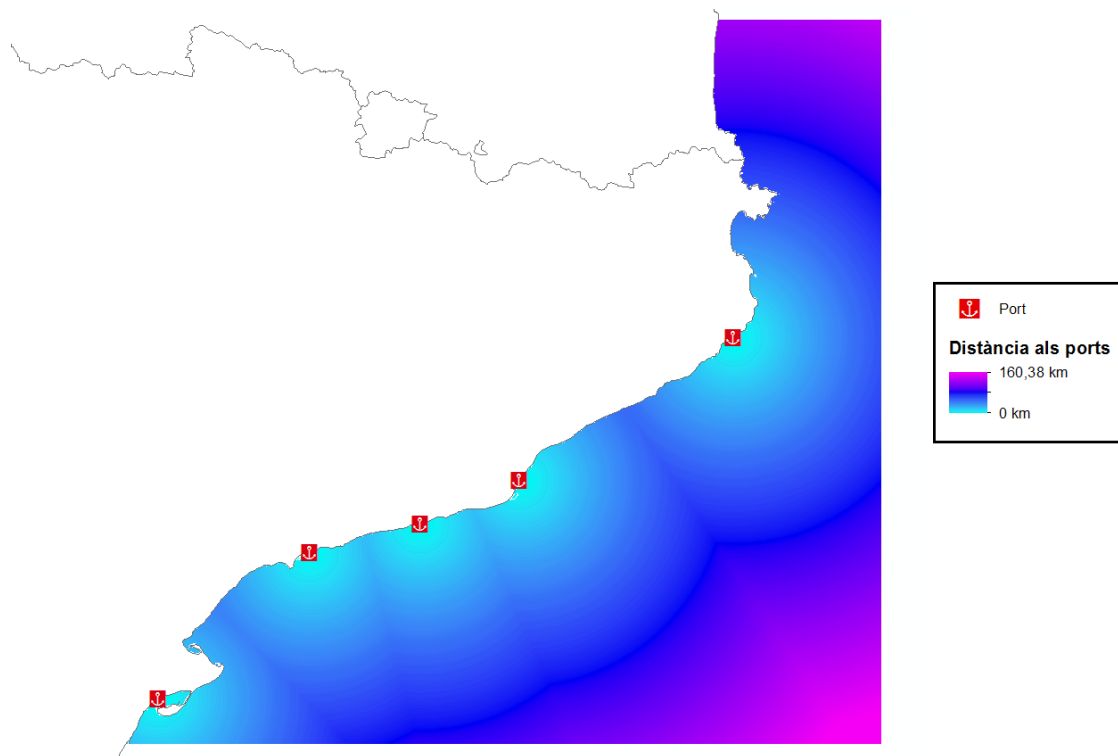
Figura 16 - Mapa ràster de distància a la costa.

#### 5.3.4 Distància als ports

Les dades que conté aquest mapa ràster estan basades en el criteri de selecció de ports més adequats per realitzar les tasques de transport i manteniment dels aerogeneradors (apartat 4.2.3.6). La variable que té emmagatzemada cada píxel es tracta de la distància que separa aquest mateix del port més proper de qualsevol dels considerats en l'estudi. És necessari, doncs, disposar d'un mapa vectorial de punts que contingui els ports en qüestió; atès que els ports s'han seleccionat d'acord amb unes característiques determinades, s'ha creat un mapa vectorial tot situant els punts que els identifiquen, a partir dels quals s'ha generat el mapa de distàncies.

<sup>6</sup> Un *shapefile* és una estructura de dades no topològica, que no emmagatzema de forma explícita relacions topològiques (proximitat, inclusió, adjacència, connectivitat) entre els elements que integren el mapa vectorial, sinó que representa aquests últims en forma d'anells, els vèrtexs dels quals es dibuixen en sentit horari; aquest fet facilita la representació dels elements, fent-la més ràpida que la d'altres estructures de dades. (Theobald, 2001)

De nou, el mapa s'ha generat amb una resolució espacial de 200x200, per assegurar la compatibilitat a l'hora de fer els càlculs amb la resta de mapes.



*Figura 17 - Mapa ràster de distància als ports i mapa vectorial dels ports considerats a l'estudi.*

### 5.3.5 Distància a les cambres hiperbàriques

Aquest mapa ràster és molt similar a aquell obtingut per a la distància als ports, encara que el mapa vectorial de base conté, en aquest cas, les cambres hiperbàriques (apartat 4.2.3.7). També en aquest cas s'ha creat el mapa de nou, mitjançant la introducció dels punts dins el mateix. D'altra banda la resolució espacial s'ha fixat en 200x200 m. Es pot observar a la Figura 18 l'aspecte del mapa descrit.

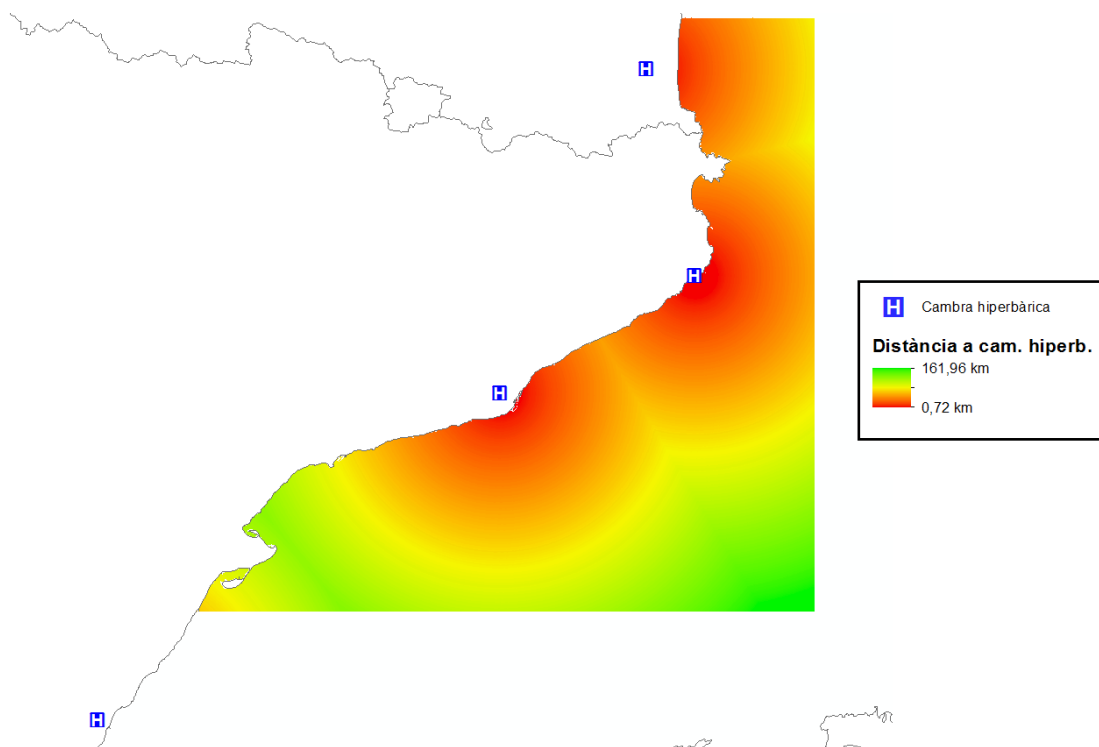


Figura 18 - Mapa de distància a les cambres hiperbàriques i mapa vectorial que conté els hospitals amb instal·lacions d'aquest tipus.

### 5.3.6 Zones naturals protegides

El mapa vectorial de zones naturals protegides (EEA, 2016) recull, en forma de polígons, les zones pertanyents a la xarxa Natura 2000. Es mostra una captura del mateix a la Figura 19.

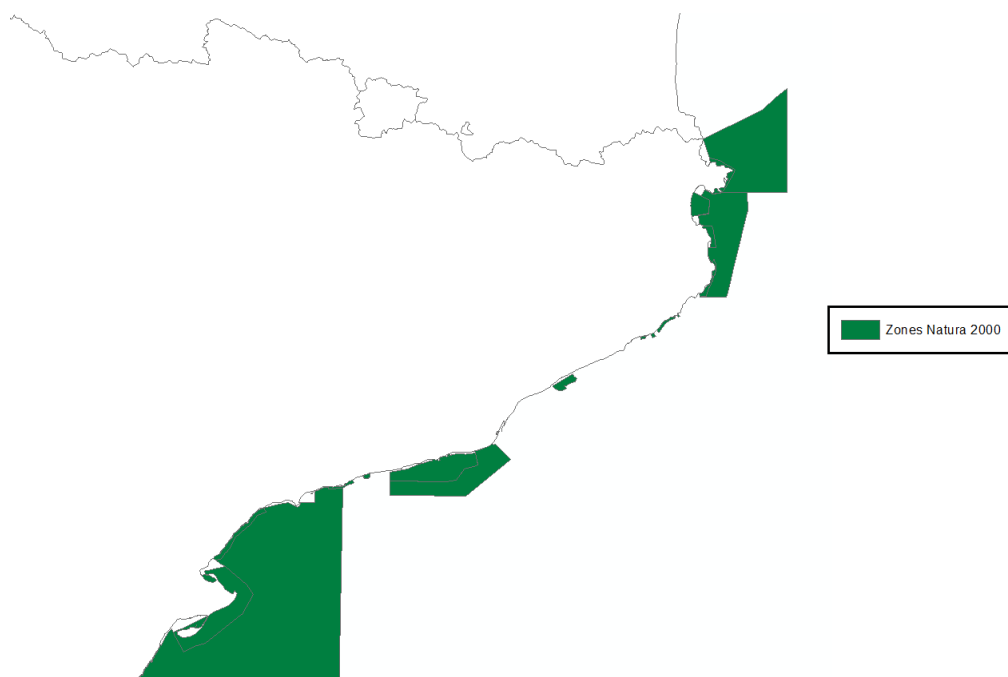


Figura 19 - Mapa vectorial d'àrees naturals protegides de la xarxa Natura 2000.

### 5.3.7 Zona d'exclusió per visibilitat

A 4.2.2.4 es descriu sota quin criteri es defineix la zona recomanada per no instal·lar-hi cap parc eòlic, de 18 quilòmetres d'ample des de la costa.

El mapa que inclou el polígon d'exclusió s'ha generat a partir del mapa que inclou la línia de costa, descrit a 5.3.3, generant una zona d'influència al voltant de la línia amb l'ample de 18 km (veure Figura 20).

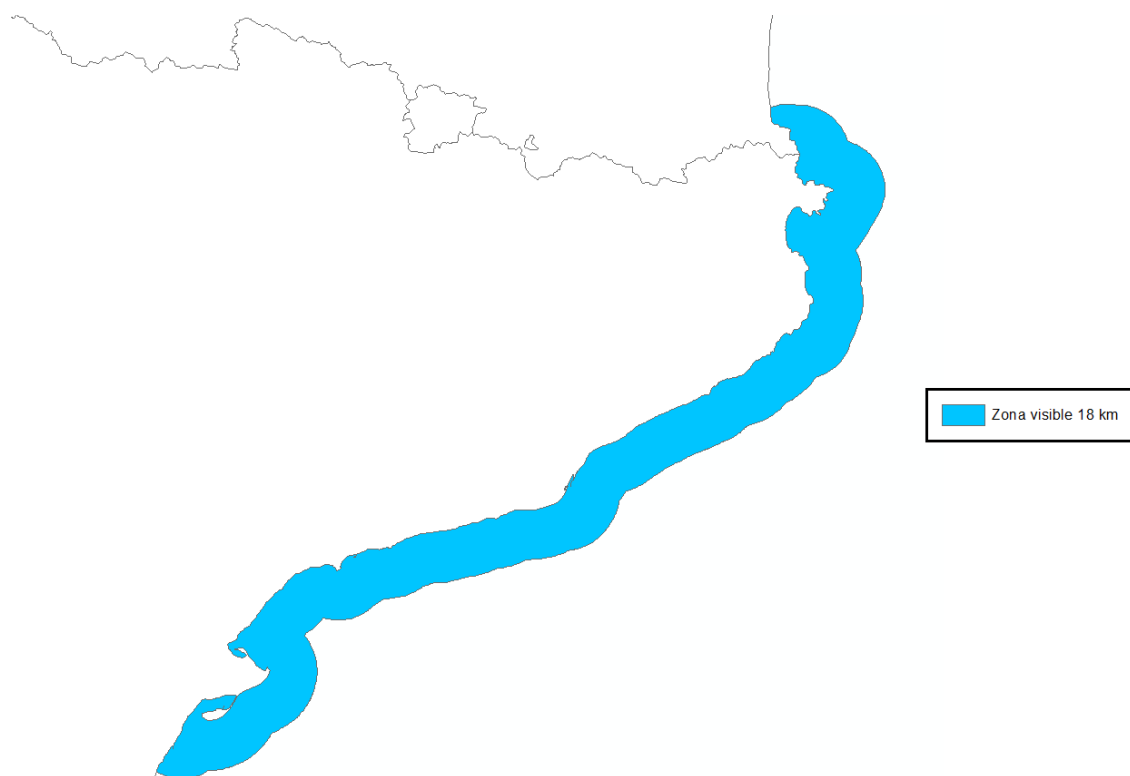


Figura 20 - Zona d'exclusió per visibilitat, de 18 quilòmetres d'amplada.

### 5.3.8 Línies de transport marítim

A més de la línia de costa, el mapa extret d'*EuroGlobalMap* inclou altres conjunts de dades, com per exemple les línies de transport marítimes. Aquestes línies han d'incloure una zona de seguretat per la incertesa del trànsit (tal i com s'explica a 4.2.2.5), de manera que s'ha executat el mateix procediment que en el cas de la zona d'exclusió per visibilitat, aquest cop amb una àrea d'influència de 500 metres. El resultat es pot visualitzar a la Figura 21.





*Figura 21 - Mapa vectorial de les rutes marítimes a la zona d'estudi.*

## 5.4 Tractament de les dades

Prèviament al càlcul del mapa final d'emplaçaments, els mapes descarregats i les dades georeferenciades han estat sotmesos a un processament, diferent segons la seva naturalesa, amb la finalitat d'homogeneïtzar les variables que representen i que estiguin totes expressades amb idèntics termes.

El mapa d'emplaçaments finals, que s'ha calculat emprant l'equació exposada a l'4.2.5, expressa quina és la puntuació entre 0 i 10 de l'emplaçament representat per cada píxel (recordem, de 200x200 m de resolució). A l'hora d'introduir l'equació al programa per fer el càlcul, és evident que totes les variables han d'estar expressades en les mateixes unitats; no obstant això, ens trobem que el mapa de recurs eòlic està expressat en metres per segon (m/s), el de batimetria en metres (m), i els de distància a la costa, als ports i a les cambres hiperbàriques en quilòmetres (km), de manera que se'ls ha aplicat una reclassificació de les dades tot atorgant puntuacions als valors representats per cadascun dels mapes. El criteri d'assignació es descriu a l'4.2.4, i és aquest rang de puntuacions emprat el que fa que el mapa d'emplaçaments també s'expressi entre 0 i 10.

El procediment explícit que s'ha seguit durant la transformació dels mapes no és considerat rellevant en la descripció del procediment de càlcul dels emplaçaments, de manera que es farà esment d'aquells detalls que han condicionat el desenvolupament del càlcul o que, senzillament, el caracteritzen. Aquests procediments, amb la finalitat

de servir com a guia per a anàlisis geoespacial semblants a la que inclou aquest estudi, es detallen als annexos d'aquesta memòria.

#### 5.4.1 Mapa de densitat de potència

Dins 4.2.3.1 s'explica que el recurs eòlic és convenient que estigui expressat en termes de densitat de potència, encara que el mapa disponible l'expressa mitjançant la velocitat del vent. Seria molt senzill aplicar un càlcul amb l'eina *calculadora ràster* de l'ArcToolbox, introduint-hi l'equació que es mostra a l'apartat esmentat anteriorment, i obtenir un nou mapa amb la densitat de potència a partir de la velocitat.

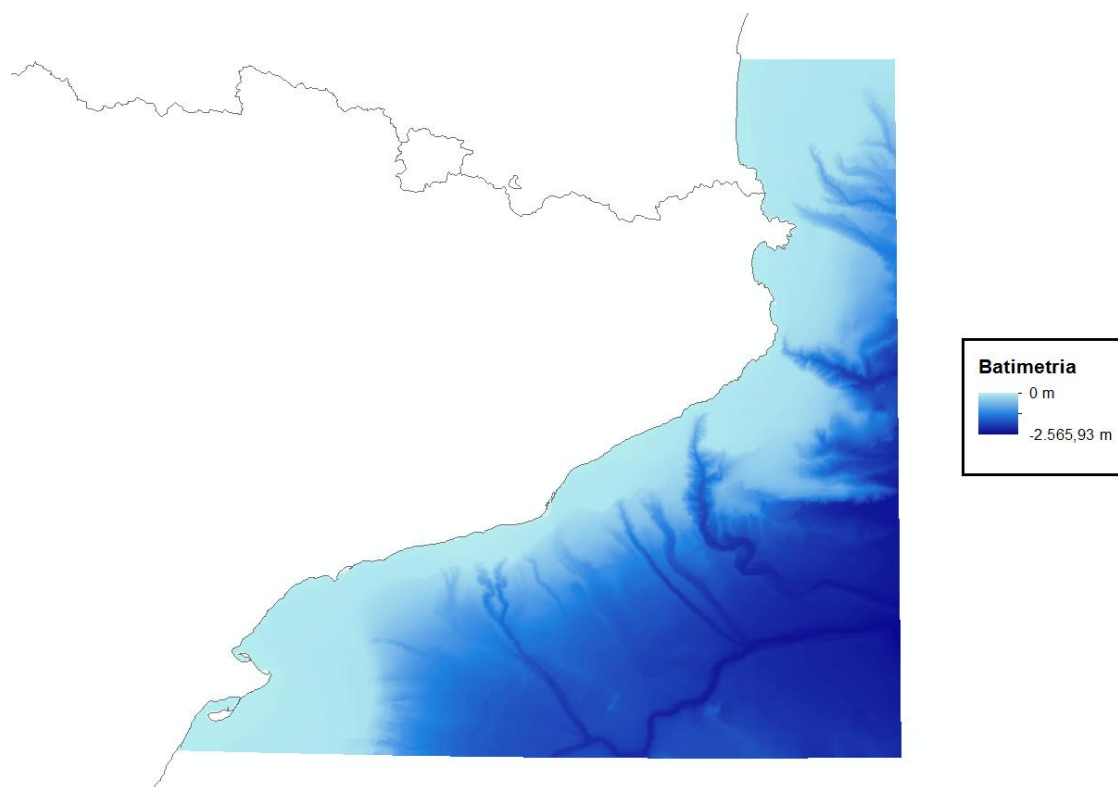
La *calculadora ràster* funciona de manera que, prenent el valor emmagatzemat al mapa de partida com a variable, hi aplica un càlcul (que introdueix l'usuari) i genera un nou mapa ràster amb el valor obtingut per a cadascun dels píxels. A l'hora de realitzar aquesta operació amb el mapa de velocitat del vent disponible al web del *Departament de Territori i Sostenibilitat* hom es troba que no hi ha la dada de la velocitat emmagatzemada a cada cel·la, sinó un seguit de nombres arbitraris que tenen associats uns intervals de velocitats, en forma de llegenda; dit d'una altra manera, els valors que es mostren a la llegenda no són els que té registrats el mapa, sinó una simbologia associada als valors reals. No és possible, per tant, treballar directament amb cap valor de velocitat fent ús d'aquest mapa.

Així, doncs, és imperatiu calcular els emplaçaments finals fent ús del mapa de velocitat mitjana anual.

#### 5.4.2 Remostreig del mapa de batimetria

Amb una resolució espacial de 230 metres, diferent d'aquella que caracteritza la resta de mapes ràster emprats, es fa necessari adaptar el mapa de batimetria per a una resolució de 200 m.

A la Figura 22 es mostra el mapa de batimetria amb resolució de 200 m; no es mostra, però, l'original de 230 m, atès que els canvis són visualment inapreciables. El mapa representat en aquesta figura és el que, finalment, s'ha fet servir càlcul d'emplaçaments.



*Figura 22 - Mapa ràster de batimetria amb resolució espacial de 200 m.*

#### 5.4.3 Reclassificació dels mapes

Amb els mapes ràster de les variables que intervenen al càlcul ja processats, el pas següent consisteix a reclassificar-los segons els criteris esmentats anteriorment; es mostra tot seguit l'aspecte dels mapes de puntuacions obtinguts arran d'aquest pas, a les figures Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 i Figura 27.

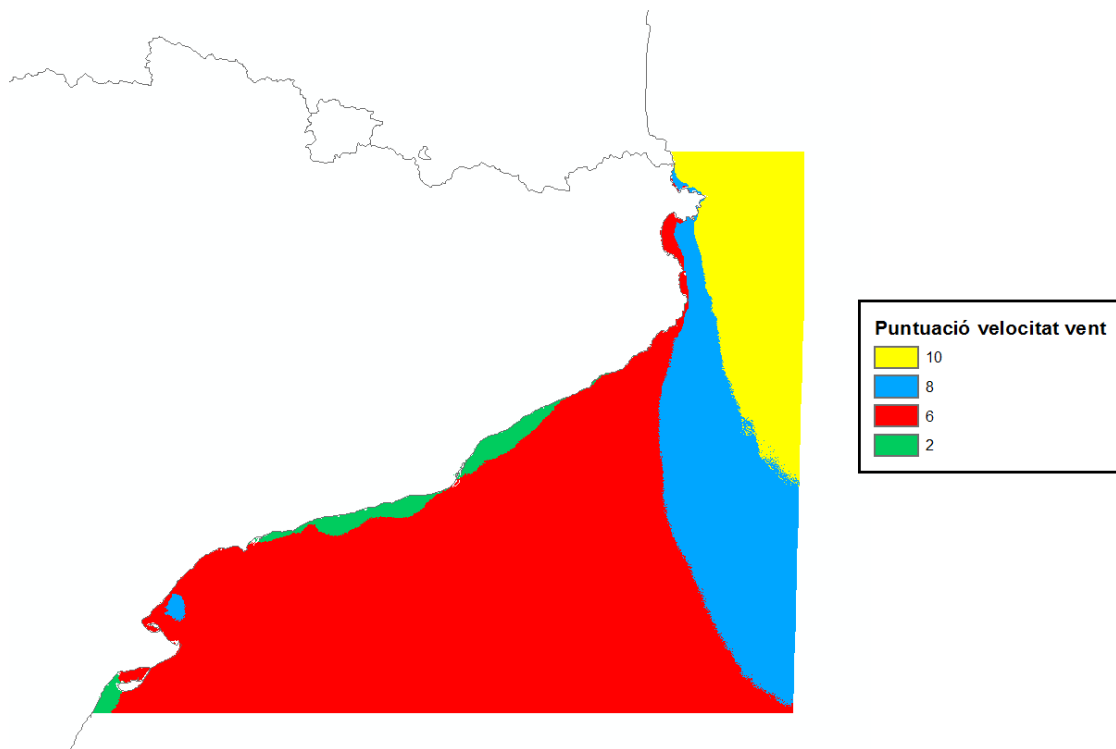


Figura 23 - Mapa de velocitat del vent reclassificat, que mostra la puntuació atorgada a cada rang de valors.

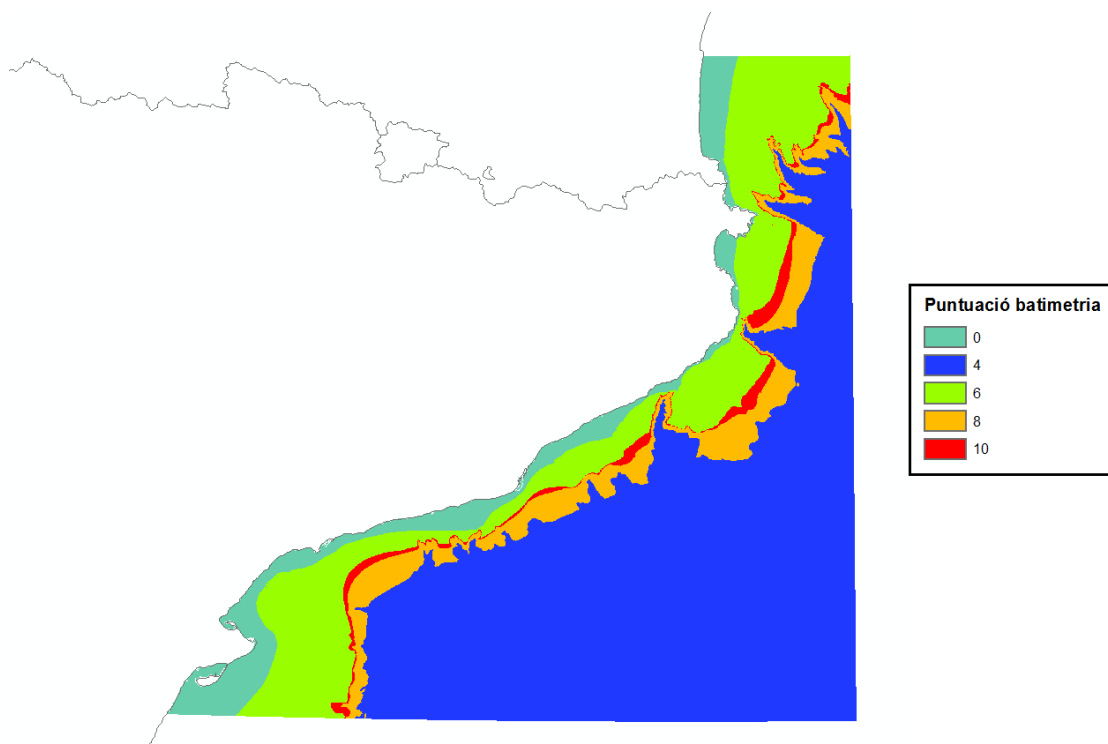


Figura 24 - Mapa de puntuació de la batimetria.

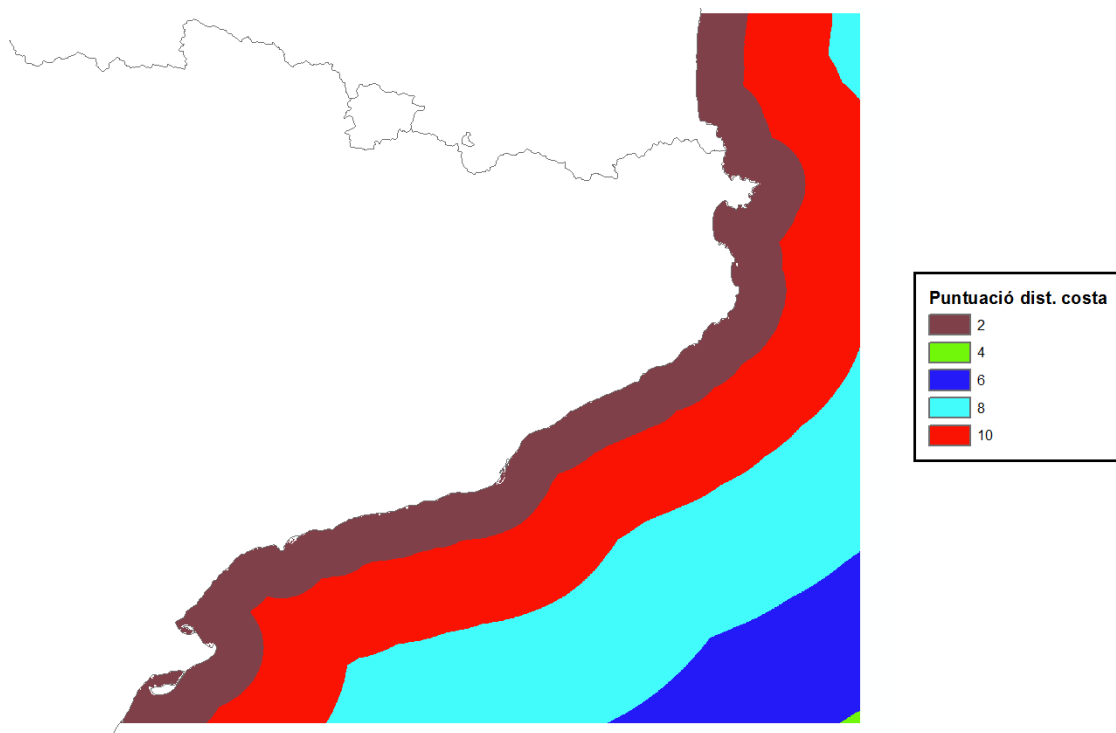


Figura 25 - Mapa de puntuació de la distància a la costa.

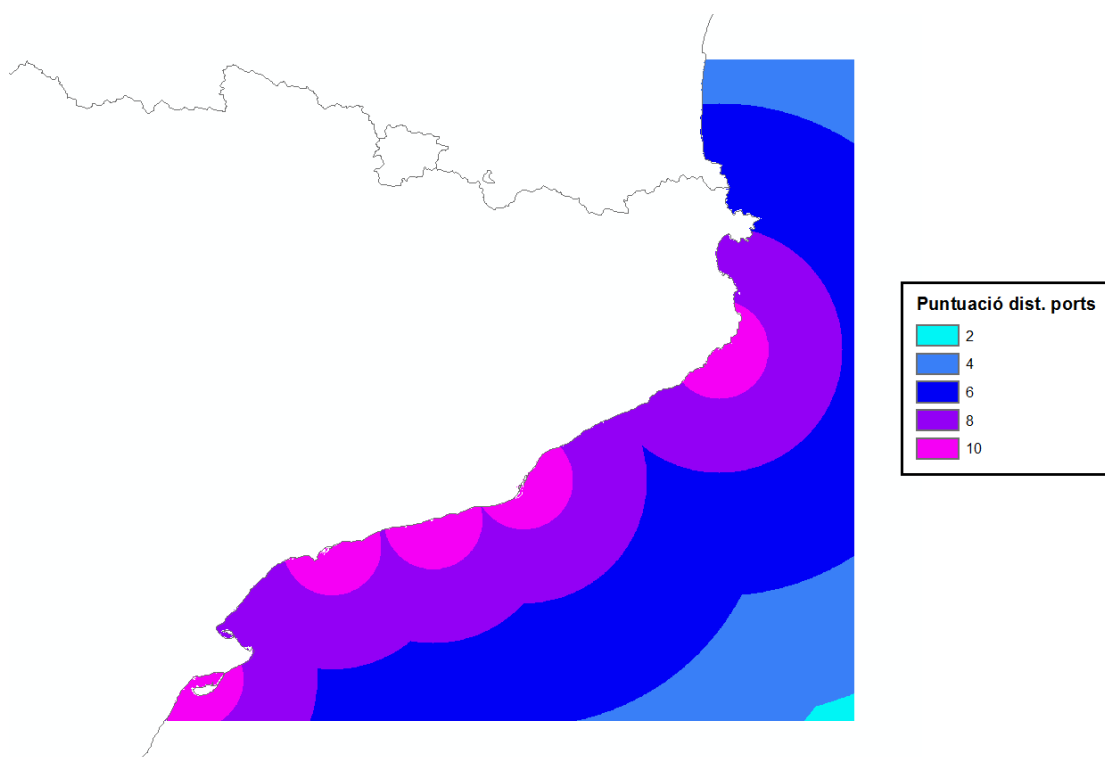


Figura 26 - Mapa de puntuació de la distància als ports.

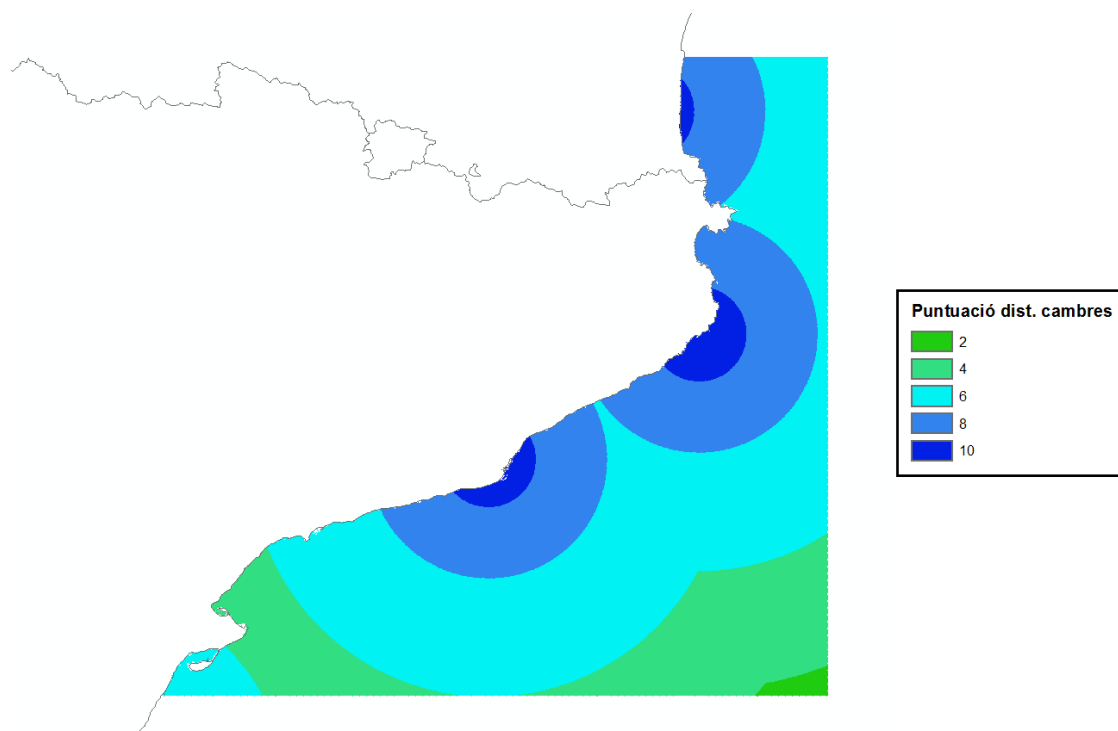
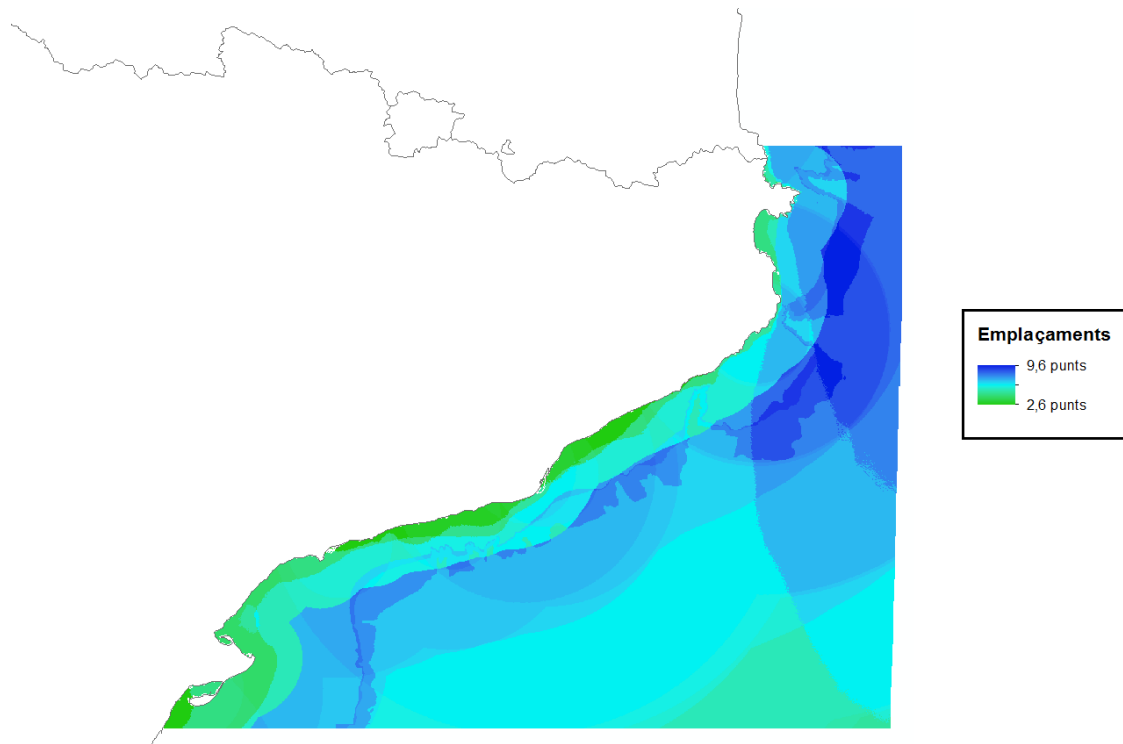


Figura 27 - Mapa de puntuació de la distància a les cambres hiperbàriques.

## 5.5 Resultats

El procés de càlcul que permet generar un mapa de puntuacions per a cada cel·la és idèntic al que es descriu a 5.4.1; en aquest cas, però, introduïm Equació 3 a la *calculadora ràster*. Fent això s'obté el mapa de la Figura 28.



*Figura 28 - Mapa d'emplaçaments finals.*

Es pot observar que a la llegenda els emplaçaments que tendeixen al verd són els més propers a 10 (màxima puntuació) i, per tant, els més adequats per a la instal·lació d'un parc eòlic. Com és lògic, ens interessa obtenir l'extensió total de les zones amb millor puntuació, atès que són les que ofereixen una rendibilitat més gran en cas d'instal·lar-hi un parc eòlic.

No és senzill establir un valor com a tall per decidir quins són bons emplaçaments i quins no ho són tant; escollir aquelles cel·les amb puntuació d'entre 9 i 10 pot semblar el criteri més raonable.

Si comparem el nombre de cel·les que queden a diferents rangs de puntuacions admissibles ens resulta el que es mostra a les figures Figura 29 i Figura 30.

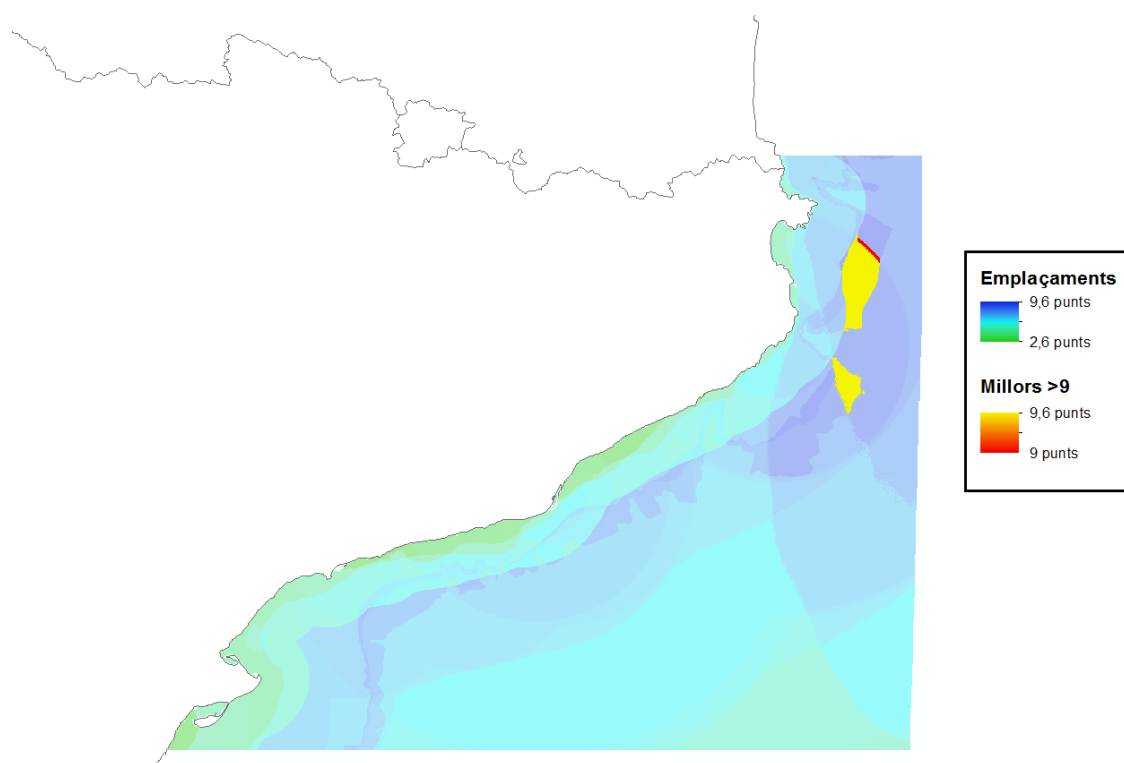


Figura 29 - Mapa d'emplaçaments amb puntuació igual o superior a 9.

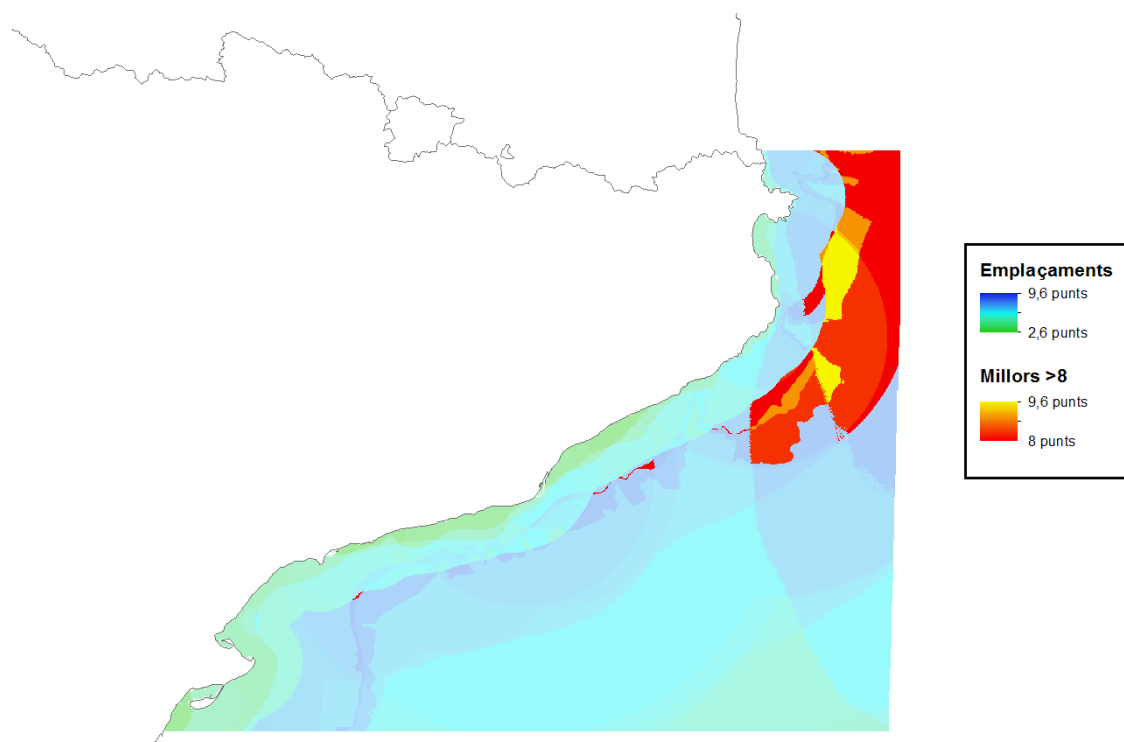
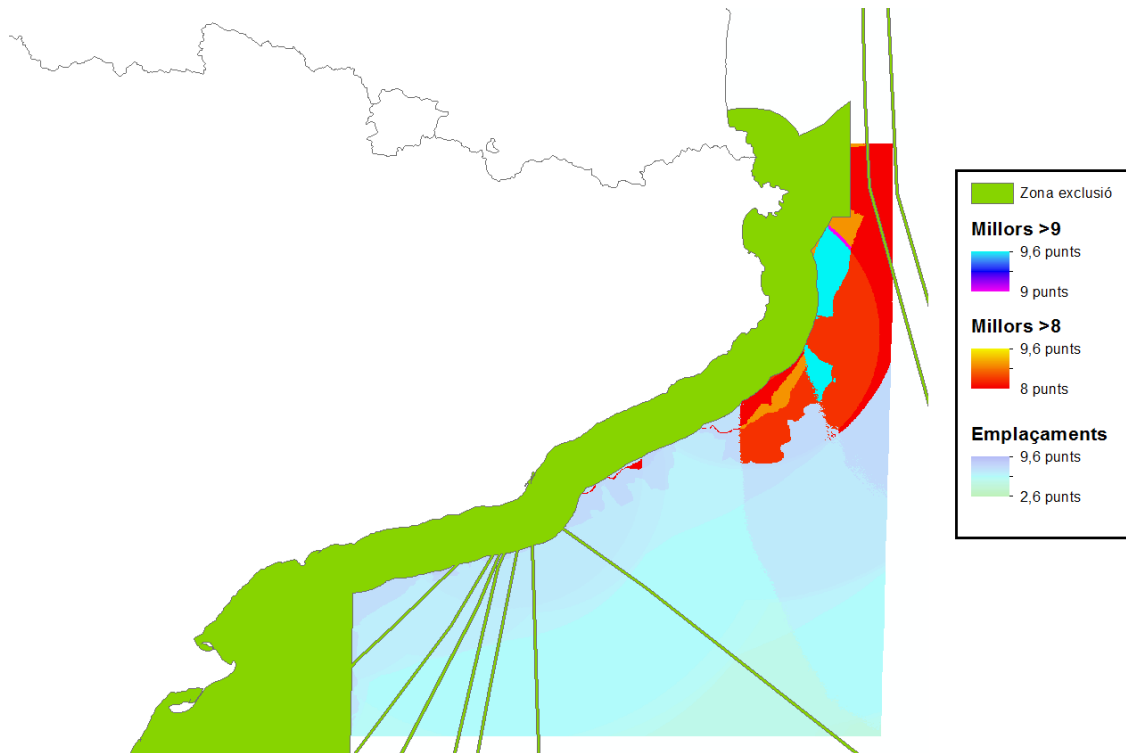


Figura 30 - Mapa d'emplaçaments amb puntuació igual o superior a 8.

Atenent a aquests resultats, no tindria sentit endurir els requisits d'allò que es considera un bon emplaçament (és a dir, fixar el tall en 9 punts) ja que la superfície



total es redueix molt. Prenent un tall més baix, per exemple 8 punts, la superfície augmenta considerablement. Així, doncs, convé establir un tall raonable, que garanteixi la viabilitat del projecte però alhora no limiti en excés la superfície d'implantació. La Figura 31 mostra la comparació entre la superfície dels emplaçaments amb puntuacions més grans de 8 i de 9, respectivament.



*Figura 31 - Comparació entre la superfície d'emplaçaments  $\geq 8$  i  $\geq 9$ ; en verd es representa la zona d'exclusió considerada a l'estudi.*

Un aspecte important del mapa d'emplaçaments és que els que tenen una puntuació més alta es troben al voltant de la Costa Brava; aquest és un resultat que es pot esperar, atès que el mapa de vent té una ponderació del 40% respecte del total, però sobretot perquè a aquesta regió hi trobem les velocitats de vent més elevades. També trobem zones amb bona puntuació a la costa del Maresme, encara que la seva mida és notablement més petita que les de la Costa Brava.

## 6 Anàlisi de sensibilitat

### 6.1.1 Mètode

Un cop s'han obtingut els resultats dels emplaçaments finals, cal preguntar-se si els criteris que s'han seguit garanteixen una robustesa dels resultats, és a dir, si la situació dels emplaçaments i la seva superfície es mantenen amb poca variació en cas que les ponderacions establertes canviïn. Per aquest motiu, és necessari tornar a calcular el mapa d'emplaçaments finals, a més del que conté els emplaçaments amb puntuació més gran de vuit; en aquesta ocasió els paràmetres es variaran un per un, alhora que la resta es redueixen en una quantitat proporcional, sempre mantenint una suma total igual a u.

La metodologia que s'ha seguit per fer aquesta variació consisteix a augmentar o disminuir un dels paràmetres una quantitat relativa determinada respecte la ponderació inicial del paràmetre en qüestió. En aquest estudi s'ha triat augmentar cada paràmetre un deu per cent, que és una quantitat petita, i tot seguit fer-ho un cinquanta per cent, que essent més gran permet establir una comparació amb el cas del 10% i analitzar la sensibilitat d'aquests paràmetres.

### 6.1.2 Procediment

Per trobar quin percentatge de reducció cal aplicar a la resta de paràmetres s'ha de fer servir una eina que resolgui equacions, atès que aquest serà proporcional al pes inicial de cadascun dels paràmetres que es volen reduir. S'explica tot seguit, mitjançant la combinació 10.1 de la Taula 10 com a exemple, com trobar els percentatges de reducció.

- *Exemple*

El vent, que inicialment tenia un pes de 0,4, a causa de l'augment del 10% ara representa el **0,44** ( $= 0,4 \cdot 1,1$ ). La suma dels altres paràmetres ha de ser, per tant, de 0,56 ( $= 1 - 0,44$ ). Aquesta xifra s'obté amb l'equació següent:

$$\overbrace{0,2 \cdot (1 - x_1)}^{\text{Batimetria}} + \overbrace{0,2 \cdot (1 - x_2)}^{\text{D. costa}} + \overbrace{0,1 \cdot (1 - x_3)}^{\text{D. ports}} + \overbrace{0,1 \cdot (1 - x_4)}^{\text{D. cambres h.}} = 0,56$$

*Equació 4 - Expressió de la reducció dels paràmetres.*

a on:

$x_1 \rightarrow$  Percentatge de reducció de la batimetria, proporcional al pes inicial de 0,2

$x_2 \rightarrow$  Percentatge de reducció de la distància a la costa, proporcional al pes inicial de 0,2

$x_3 \rightarrow$  Percentatge de reducció de la distància als ports, proporcional al pes inicial de 0,1

$x_4 \rightarrow$  Percentatge de reducció de la distància a les cambres hiperbàriques, proporcional al pes inicial de 0,1

Els paràmetres  $x_i$  són els que cal cercar. L'eina més senzilla de fer servir és el complement *Solver* de *Microsoft Excel*; en aquest cas cal imposar les condicions següents:

Valor objectiu  $\rightarrow 0,56$

Subjecte a les condicions  $\rightarrow \begin{cases} x_1 = x_2 \\ x_2 \geq x_3 \\ x_3 = x_4 \end{cases}$

a on:

$x_1 = x_2 \leftrightarrow$  Batimetria i *D. costa* tenen un pes de 0,2

$x_2 \geq x_3 \leftrightarrow$  *D. costa* té un pes més gran que *D. ports*

$x_3 = x_4 \leftrightarrow$  *D. ports* i *D. cambres h.* tenen un pes de 0,1

D'aquesta forma obtindrem els valors:

$$x_1 = x_2 = 0,0849999 \equiv \mathbf{8,4999\%}$$

$$x_3 = x_4 = 0,0299999 \equiv \mathbf{2,9999\%}$$

Finalment:

$$\text{Batimetria} \rightarrow 0,2 \cdot (1 - x_1) = \mathbf{0,183}$$

$$\text{D. costa} \rightarrow 0,2 \cdot (1 - x_2) = \mathbf{0,183}$$

$$\text{D. ports} \rightarrow 0,1 \cdot (1 - x_3) = \mathbf{0,097}$$

$$\text{D. cambres h.} \rightarrow 0,1 \cdot (1 - x_4) = \mathbf{0,097}$$

Repetint el procés que s'ha descrit a l'exemple anterior amb cadascun dels cinc paràmetres de l'equació 3, obtenim els valors recollits a les taules Taula 10 i Taula 11; els valors marcats en porpra són aquells que han estat augmentats a cada combinació.

Taula 10 - Paràmetres de l'equació d'emplaçaments finals, augmentant-los un 10%.

Criteri +10%	Vent	Batimetria	Costa	Ports	Cambres	$\Sigma$	Núm. combinació
Sensibilitat del vent	0,44	0,183	0,183	0,097	0,097	1	10.1
S. de la batimetria	0,3882	0,22	0,1941	0,0988	0,0988	1	10.2
S. distància a la costa	0,3882	0,1941	0,22	0,0988	0,0988	1	10.3
S. distància als ports	0,3955	0,1977	0,1977	0,11	0,0988	1	10.4
S. distància a les cambres	0,3955	0,1977	0,1977	0,0988	0,11	1	10.5

Taula 11 - Paràmetres de l'equació d'emplaçaments finals, augmentant-los un 50%.

Criteri +50%	Vent	Batimetria	Costa	Ports	Cambres	$\Sigma$	Núm. combinació
Sensibilitat del vent	0,6	0,133	0,133	0,066	0,066	1	50.1
S. de la batimetria	0,35	0,3	0,175	0,0875	0,0875	1	50.2
S. distància a la costa	0,35	0,175	0,3	0,0875	0,0875	1	50.3
S. distància als ports	0,3778	0,1889	0,1889	0,15	0,0944	1	50.4
S. distància a les cambres	0,3778	0,1889	0,1889	0,0944	0,15	1	50.5

El pas següent ha consistit a introduir aquestes deu equacions a la *calculadora ràster* de l'ArcMap, tot repetint el procés descrit a **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.**; fent això s'han obtingut nous mapes d'emplaçaments, dels que se n'ha extret l'àrea amb una puntuació igual o més gran a vuit.

### 6.1.3 Resultats

Els emplaçaments que s'han obtingut a les deu combinacions estan situats, de nou, a les zones de la Costa Brava i el Maresme; la diferència entre ells és l'extensió d'aquestes, encara que les del Maresme desapareixen en aquelles combinacions on el vent augmenta la seva proporció respecte els altres paràmetres, molt probablement degut a la sensiblement menor ponderació de la batimetria, de 0,2 (aquestes àrees coincideixen amb la franja de puntuació 10 del mapa de batimetria).

Sense establir cap diferència entre les dues zones esmentades (és a dir, considerant que totes les cel·les es troben juntes), la millor forma de comparar l'extensió és comptar el nombre de cel·les amb dades (amb puntuació) i fer-ne una comparació. A la Taula 12 es recull, juntament amb el nombre de cel·les, la superfície útil total; tanmateix s'hi inclouen els valors relatius al mapa d'emplaçaments amb puntuació superior a 8 que es mostra a 5.5, de manera que es pot fer una comparació directa entre aquest i els 10 calculats a l'anàlisi.

Taula 12 - Resultats obtinguts amb les ecuacions calculades.

Combinació	Cel·les	Sup. útil (km <sup>2</sup> )	Variació resp. Original (%)
<b>Original</b>	78.534	3.141,36	-
<b>10.1</b>	74.766	2.990,64	-4,797922
<b>10.2</b>	53.259	2.130,36	-32,18351
<b>10.3</b>	78.531	3.141,24	-0,00382
<b>10.4</b>	56.455	2.258,2	-28,11394
<b>10.5</b>	56.455	2.258,2	-28,11394
<b>50.1</b>	86.754	3.470,16	10,4668
<b>50.2</b>	27.903	1.116,12	-64,47017
<b>50.3</b>	79.501	3.180,04	1,231314
<b>50.4</b>	52.684	2.107,36	-32,91568
<b>50.5</b>	52.684	2.107,36	-32,91568

Fent un cop d'ull a la taula anterior, es pot observar que la batimetria és el paràmetre més sensible de tots, ja que la superfície útil total es redueix a menys de la meitat de l'original. Si ens fixem en el mapa de puntuacions de la batimetria (Figura 24), hi trobarem l'explicació possible a aquest resultat.

A la Figura 32 es mostra una comparació entre l'extensió del mapa original i la de la combinació 50.2; una important zona situada a l'est desapareix, fet que redueix l'extensió total d'aquest cas concret. Observant, ara, la Figura 33 trobem que aquesta franja que desapareix és coincident amb l'àmbit que ha estat designat amb quatre punts al mapa de la Figura 24. Així, doncs, aquesta franja disposa de menys punts en total quan els quatre que aporta la batimetria compten més que no pas els que aporten els altres mapes.

Aquest fenomen també és el que fa que a la combinació 10.1 hi hagi una pèrdua de gairebé el 5%, una quantitat acceptable; en aquest cas, però, la franja que s'elimina es troba, majoritàriament, a la zona de puntuació 6 del mapa de puntuacions de la batimetria, que és molt estreta (veure Figura 33).

D'altra banda, la combinació 50.1 és l'única que registra un augment de la superfície significatiu (la 50.3 registra un augment mínim), atès que l'augment del pes del vent dins la ponderació final provoca l'aparició d'una franja que coincideix amb l'àrea de màxima puntuació al mapa de puntuació del vent (veure figures Figura 23 i Figura 34).

Quant a les combinacions 10.4, 10.5, 50.4 i 50.5, la reducció tan significativa de cel·les respecte el mapa original s'explica per la desaparició d'una zona a l'est que desapareix, atès que coincideix amb la zona amb puntuació 6 dels mapes de puntuació de distància a ports i cambres hiperbàriques (figures Figura 26 i Figura 27). En el cas de les combinacions 50.4 i 50.5 també hi desapareix la mateixa franja que es descriu a la combinació 10.1; es mostra aquest cas a la Figura 35, que és representativa de les combinacions 50.4 i 50.5, atès que, per a la zona on hi ha emplaçaments amb puntuació superior a 8, els mapes de les figures 20 i 21 són pràcticament idèntics.

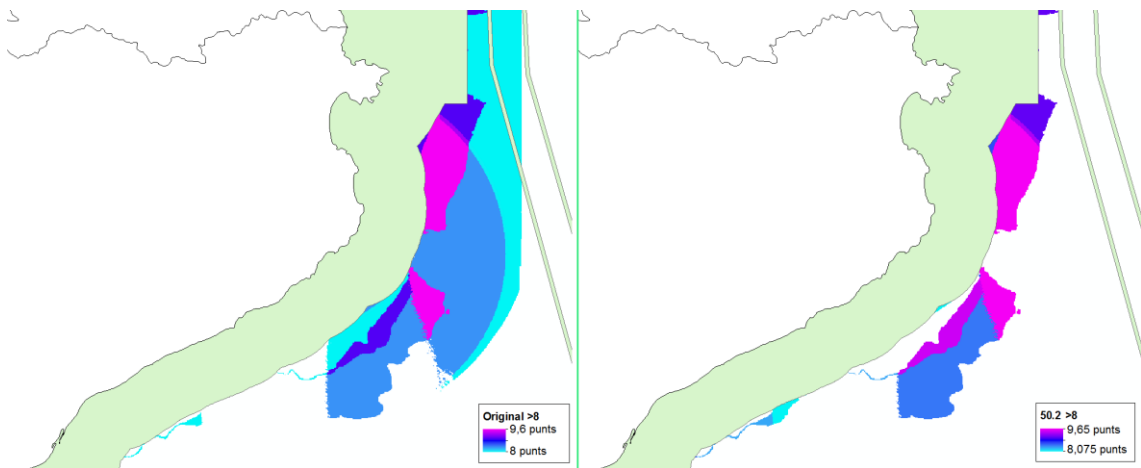


Figura 32 - Mapa d'emplaçaments original (esquerra) i de la combinació 50.2 (dreta).

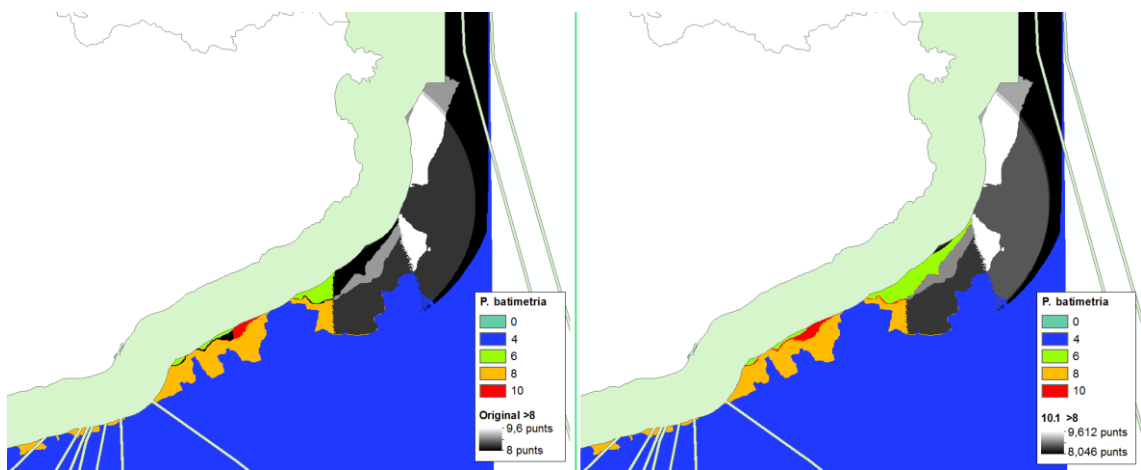


Figura 33 - Emplaçaments originals (esquerra) i de la combinació 10.1 (dreta); ambdós en blanc i negre.

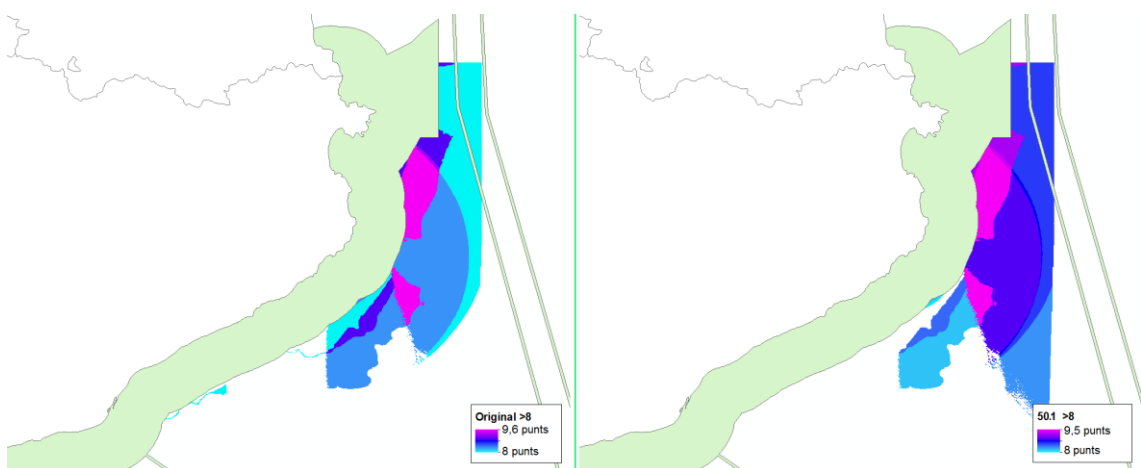


Figura 34 - Emplaçaments originals (esquerra) i de la combinació 50.1 (dreta).

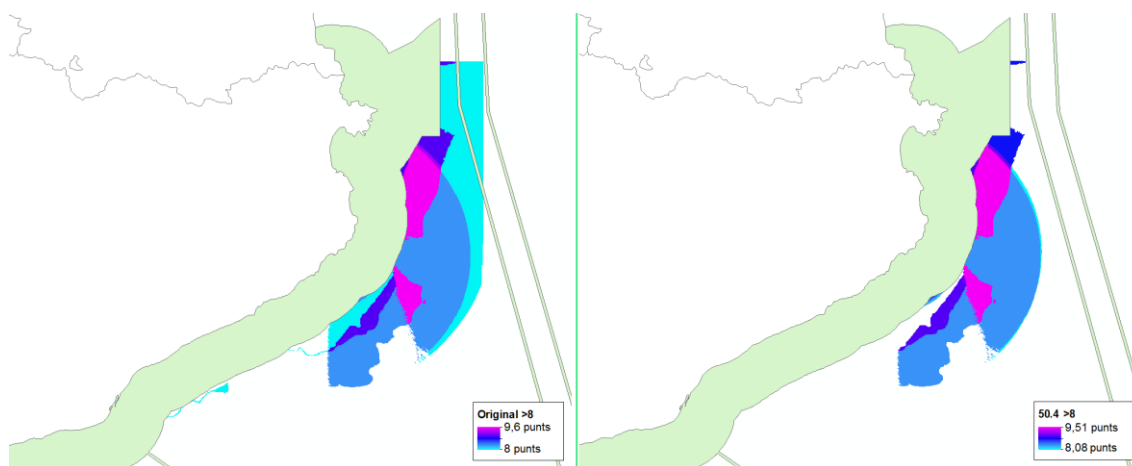


Figura 35 - Emplaçaments originals (esquerra) i de la combinació 50.4 (dreta).

#### 6.1.4 Conclusions quant a la sensibilitat

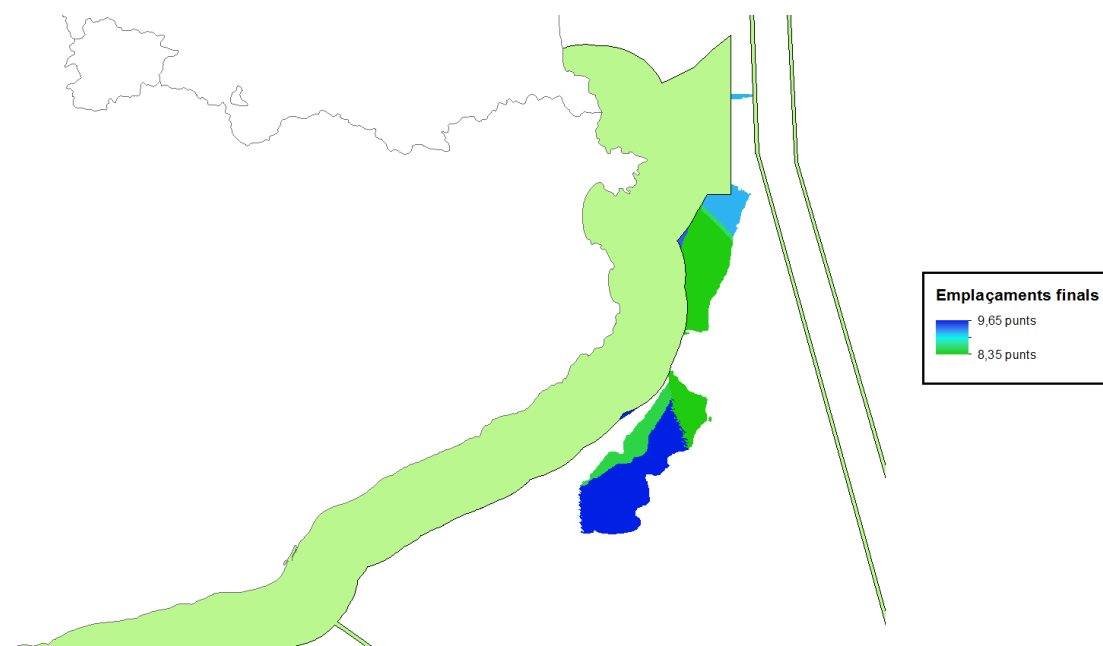
De l'anàlisi dels resultats anterior podem extreure la conclusió que la configuració dels pesos assignats als mapes, descrita a 5.3, és el factor que més influeix sobre la sensibilitat dels mapes emprats. El fet que hi hagi franges amb puntuacions més aviat baixes provoca que, juntament amb una ponderació també reduïda de la variable a l'equació dels emplaçaments, les faci desaparèixer; si, a més, aquestes franges són molt extenses és fàcil que en el cas de no sumar prou punts al mapa d'emplaçaments finals restin una quantitat enorme de superfície.

Per tant, una correcta assignació de pesos a les dades de cada variable és fonamental, especialment en aquelles variables que tindran una ponderació més gran a l'equació final (en aquest cas, la velocitat del vent).

Amb el mateix raonament exposat més amunt, una assignació de pesos massa optimista pot fer aparèixer zones al mapa final dins les quals no sigui rendible instal·lar-hi parcs eòlics.

Aquestes consideracions recomanen, per tant, deixar de banda les zones que desapareixen a les diferents combinacions calculades a l'anàlisi i considerar com a zones aptes aquelles que apareixen a totes elles. Tot i que aquest és un criteri conservador, no es consideren pas les zones eliminades com a no aptes, però caldria portar a terme estudis més exhaustius per validar-les. Amb una assignació de pesos més progressiva els resultats podrien millorar, molt probablement.

Es mostren a la Figura 36 els emplaçaments finals calculats. Tot i que tenen puntuacions diferents, les zones adjacents amb colors diferents formen una de sola, és a dir, que trobem una gran zona al nord, davant el Cap de Creus, i una altra al sud, davant el Baix Empordà i la Selva; per distingir-les correctament, en endavant seran anomenades *emplaçament nord* i *emplaçament sud*, respectivament.



*Figura 36 - Emplaçaments finals*



## 7 Instal·lació de parcs eòlics als emplaçaments finals

A l'hora de definir la instal·lació d'un parc eòlic, cal tenir presents alguns aspectes tècnics per garantir la rendibilitat energètica del parc.

Tal i com s'explica a *The Wind Farm Layout Optimization Problem* (Samorani, 2013) quan una massa d'aire travessa l'àrea d'escombratge de les pales d'un aerogenerador, es genera un volum d'aire turbulent en forma de con darrere d'aquesta àrea. Aquest fenomen provoca que els aerogeneradors que es troben situats darrere el primer (i dins el con) tinguin una eficiència menor; per reduir aquesta inconveniència, s'han definit unes recomanacions quant a la separació que han de tenir les turbines, així com també quant a la posició relativa entre les mateixes. Aquesta recomanació estableix que, en direcció paral·lela al vent dominant, la separació entre turbines ha de ser d'entre cinc i nou cops el diàmetre del rotor, mentre que en direcció perpendicular es parla d'entre tres i cinc cops aquest valor; tanmateix la disposició relativa convé que sigui a portell, és a dir, que les files d'aerogeneradors en direcció perpendicular a la del vent dominant es trobin desplaçades respecte les adjacents una distància de dos cops el diàmetre del rotor.

A la Figura 37 es mostra la disposició de les turbines d'acord amb aquest criteri (Samorani, 2013).

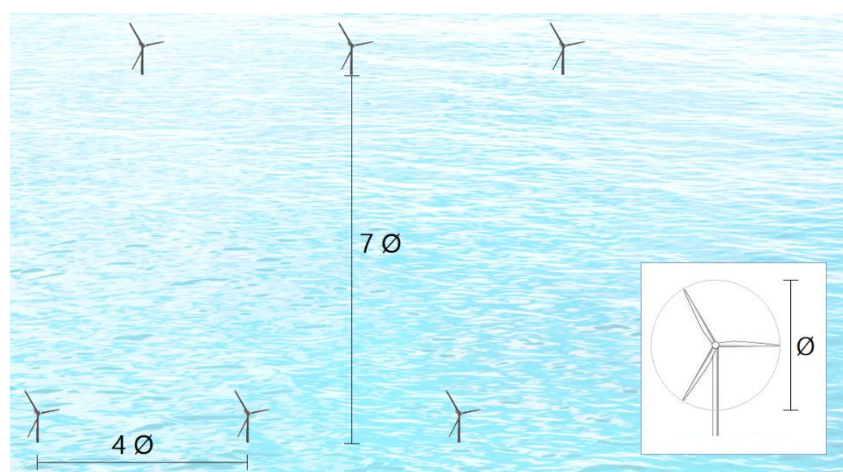


Figura 37 - Separacions recomanades entre aerogeneradors

Tot i que la naveta és orientable per dirigir el rotor perpendicularment a la direcció del vent que bufi en un moment determinat, el parc ha d'estar orientat cap a la direcció dominant del vent a l'emplaçament. Aquesta dada, en el cas dels dos emplaçaments calculats als capítols anteriors, s'ha obtingut del web *meteo.cat* (SMC, 2017), des d'on es pot visualitzar un anuari de dades climatològiques procedents de la *Xarxa d'Estacions meteorològiques Automàtiques (XEMA)*, repartides per tot Catalunya.

De la llista d'estacions disponibles, s'ha consultat la direcció dominant del vent anual corresponent a aquelles situades a Sant Pere Pescador (Alt Empordà) i Castell d'Aro (Baix Empordà), atès que són les més properes als emplaçaments dels parcs eòlics

situats mar endins. Aquestes dues estacions s'han escollit, a més, perquè disposen de d'una direcció dominant molt consistent a la sèrie històrica compresa entre el 2007 i el 2016. Es reproduïxen aquestes dades a la Taula 13 (SMC, 2017).

Taula 13 - Direcció dominant del vent a la sèrie històrica 2007-2016.

EMA	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Sant Pere Pescador</b>	NW	NW	NW	NW	NW	W	NW	W	NW	NW
<b>Castell d'Aro</b>	W	-	W	W	W	W	W	W	W	W

Així, doncs, els parcs situats a l'*emplaçament nord* haurien d'estar orientats en direcció nord-oest i aquells situats a l'*emplaçament sud* s'orientaran en direcció oest.

Considerant un parc amb 50 aerogeneradors, ens queda per definir quin tipus de turbina s'hi instal·larà. En aquest sentit, prendrem com a referència el model *NREL 5-MW*, descrit a *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development* (J. Jonkman, 2009). Aquest document descriu la definició del model de turbina esmentat, que pretén ser una referència per al desenvolupament de projectes i estudis dins la matèria de l'energia eòlica marina; les seves característiques es basen en d'altres prototips semblants, tot agafant les característiques més adequades de cadascun d'ells.

El rotor del *NREL 5-MW* està situat a 90 metres d'alçada, i el seu diàmetre és de 126 m. Amb aquesta dada podem establir la separació dels aerogeneradors dins el parc; es proposa fer una distribució de cinc files amb deu turbines cadascuna. La separació entre files seria de  $7 \cdot 126 = 882$  m i, dins de cada fila, la separació entre els aerogeneradors seria de  $4 \cdot 126 = 504$  m. Fent un senzill càlcul podem veure que l'extensió del parc seria de  $3.528 \times 4.788$  m, que en total suposa una superfície de  $16.892.064 \text{ m}^2$ .

D'altra banda, les superfícies dels emplaçaments calculats són les exposades a la Taula 14:

Taula 14 - Superfície dels emplaçaments

	Superfície total (km <sup>2</sup> )
<b>Emplaçament nord</b>	652.293.392
<b>Emplaçament sud</b>	406.752.738

Amb aquestes dades es pot determinar que, assumint una superfície de forma rectangular i orientada en la direcció del vent dominant a cadascuna d'elles, es podrien instal·lar un bon nombre de parcs eòlics dins, cadascun amb una potència nominal de 250 MW.

Com a exemple de la superfície que ocuparia un parc eòlic amb les característiques esmentades es mostra, a les figures Figura 38 i Figura 39, dos exemples d'un parc situat a les zones *emplaçament nord* i *emplaçament sud*.

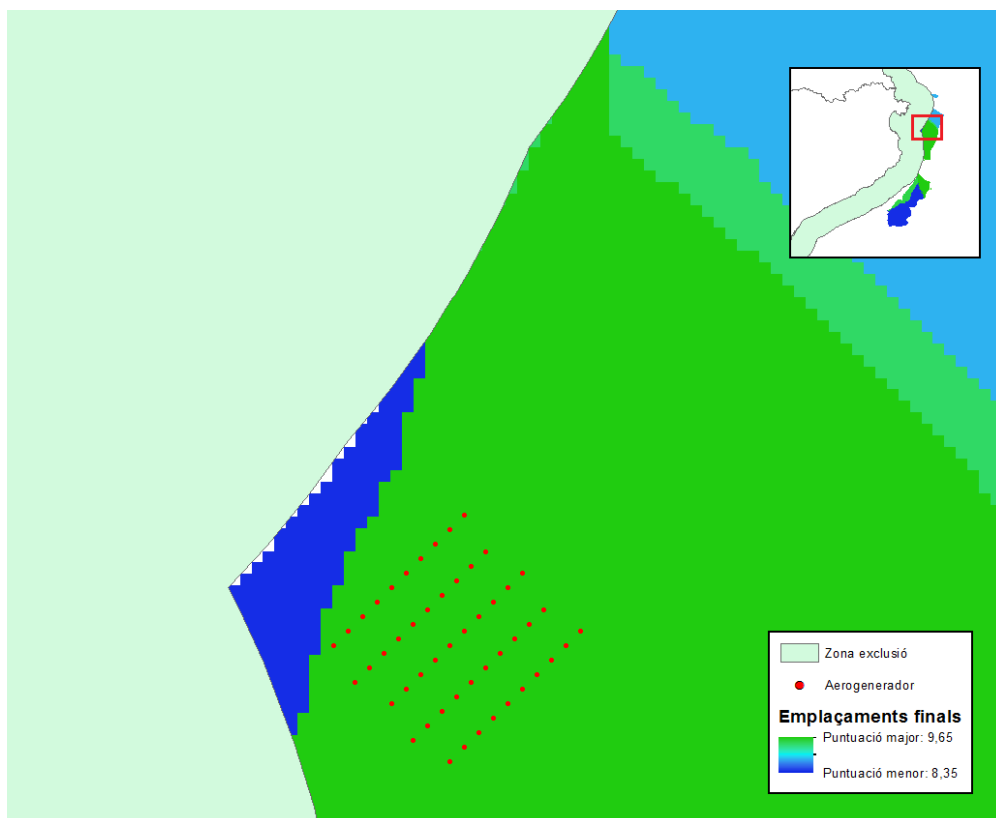


Figura 38 - Situació d'un parc eòlic a l'emplaçament nord.

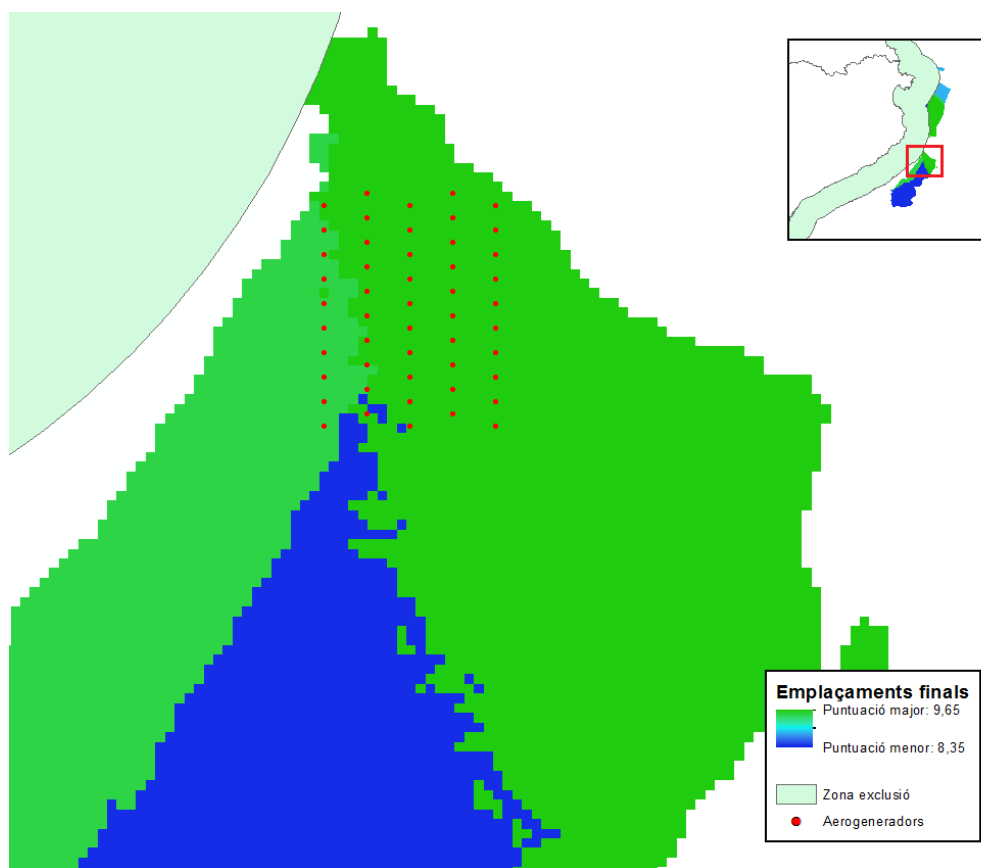


Figura 39 - Situació d'un parc eòlic a l'emplaçament sud.

## 8 Conclusions

És un fet que la importància de l'electricitat generada mitjançant les energies renovables dins el mercat elèctric creix cada cop més, atès que la pressió per assolir nivells de contaminació cada cop més reduïts i la progressiva reducció dels costos de producció imposen aquesta tendència. El potencial de l'energia eòlica, que porta dècades esdevenint una alternativa molt rendible i fiable, no està pas esgotat, sinó que amb els aerogeneradors flotants encara pot ésser desenvolupat i, per tant, oferir quelcom encara més interessant de cara a substituir les fonts d'energia fòssil o nuclear de fissió.

Una adequada implantació d'aquesta tecnologia a Catalunya requereix estudiar a quines zones és adient implantar parcs eòlics d'aquest tipus, tant des del punt de vista econòmic com ambiental. L'anàlisi geoespacial multicriteri s'ha erigit com el mètode amb millor relació entre complexitat i fiabilitat dels resultats.

Quant al tractament de les dades, a l'hora de calcular el mapa d'emplaçaments ha calgut realitzar diverses ponderacions, una per cada variable i una altra pel mapa d'emplaçaments finals; aquest fet provoca que els resultats puguin canviar sensiblement ja que hi ha franges de diferents mides amb puntuacions mitjanes o baixes, que en sumar-se amb d'altres mapes poden donar lloc a zones amb puntuacions massa baixes per esser considerades aptes.

Després de calcular el mapa d'emplaçaments, s'ha discutit que el límit entre emplaçaments amb bona puntuació i sense, s'establia als 8 punts, atenent a la quantitat de possibles emplaçaments que es perdien si es fixava als 9 punts.

Els emplaçaments que des d'un començament tenien una puntuació superior a 9 han quedat amb la mateixa puntuació, però algunes de les zones que els envolten són també prou robustes, i per tant es considera que el criteri de establir el tall als 8 punts és encertat.

Finalment, els dos grans emplaçaments resultants tenen una gran extensió, que permet instal·lar-hi diversos parcs alhora dins de cadascun; a més, la seva proximitat permetria reduir costos de manteniment i de la instal·lació del cable submarí.

Així, doncs, s'ha demostrat que la costa de Catalunya ofereix un potencial considerable per implantar la tecnologia dels aerogeneradors flotants.

## 9 Bibliografia

- CNMC. 2017.** Listado de Informes de Etiquetado de Electricidad. *Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia*. [En línia] 2017. [Data: 16 / abril / 2017.] <https://gdo.cnmc.es/CNE/resumenGdo.do?>.
- Comas, D. i E., Ruiz. 1993.** *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*. s.l. : Ed. Ariel, SA, 1993. 84-344-3452-0.
- CSI. 2017.** Cartera de serveis. *Consorci Sanitari Integral*. [En línia] 2017. [Data: 19 / 11 / 2016.] [https://www.csi.cat/ciudadans/centres/hospital-moises-broggi/cartera\\_serveis.html](https://www.csi.cat/ciudadans/centres/hospital-moises-broggi/cartera_serveis.html).
- DTiS [1]. 2013.** Normativa per a la implantació i l'avaluació d'impacte ambiental de l'energia eòlica. *Departament de Territori i Sostenibilitat*. [En línia] 14 / Octubre / 2013. [Data: 22 / 11 / 2016.] [http://mediambient.gencat.cat/ca/05\\_ambits\\_dactuacio/avaluacio\\_ambiental/avaluacio\\_dim\\_pacte\\_ambiental\\_de\\_projectes/energia\\_eolica/normativa/](http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/avaluacio_ambiental/avaluacio_dim_pacte_ambiental_de_projectes/energia_eolica/normativa/).
- DTiS [2]. 2010.** Vent mitjà anual a 80 m d'altitud (km/h, m/s). *Departament de Territori i Sostenibilitat*. [En línia] 19 / Juny / 2010. [Data: 2 / 12 / 2016.] [http://territori.gencat.cat/ca/01\\_departament/12\\_cartografia\\_i\\_toponimia/bases\\_cartografiques/medi\\_ambient\\_i\\_sostenibilitat/bases\\_miramont/atmosfera-00001/02/](http://territori.gencat.cat/ca/01_departament/12_cartografia_i_toponimia/bases_cartografiques/medi_ambient_i_sostenibilitat/bases_miramont/atmosfera-00001/02/).
- EEA. 2016.** Natura 2000 data - the European network of protected sites. *European Environment Agency's home page*. [En línia] European Environment Agency, 24 / Març / 2016. [Data: 15 / 11 / 2016.] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/natura-7#tab-gis-data>.
- EMODnet Bathymetry. 2009.** EMODnet bathymetry portal. *Portal for Bathymetry*. [En línia] 4 / Juny / 2009. [Data: 15 / 10 / 2016.] <http://portal.emodnet-bathymetry.eu>.
- Ferreño, Sara i Díaz-Casas, Vicente. 2016.** Present and Future of Floating Offshore Wind. [autor llibre] Laura Castro-Santos i Vicente Díaz-Casas. *Floating offshore wind farms*. Cham : Springer International Publishing AG, 2016.
- GVA. 2017.** Medicina hiperbàrica - Departament Salut Castelló. *Conselleria de Sanitat Universal i Salut Pública*. [En línia] 2017. [Data: 19 / 11 / 2016.] <http://castellon.san.gva.es/ubicacion1>.
- ICAEN. 2016.** Pacte Nacional per a la Transició Energètica de Catalunya. *Institut Català d'Energia*. [En línia] 25 / novembre / 2016. [Data: 12 / abril / 2017.] [http://icaen.gencat.cat/ca/plans\\_programes/transicio\\_energetica/](http://icaen.gencat.cat/ca/plans_programes/transicio_energetica/).
- IEC. 2017.** Wind Speed and Power - Iowa Energy Center. *Iowa Energy Center*. [En línia] 2017. [Data: 2 / 1 / 2017.] <http://www.iowaenergycenter.org/wind-energy-manual/wind-and-wind-power/wind-speed-and-power/>.
- IEO. 2016.** *Visor de Información Marina del Instituto Español de Oceanografía*. [En línia] 2016. [Data: 2 / 12 / 2016.] <http://www.ideo-base.ieo.es/>.
- J. Jonkman, et al. 2009.** *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*. National Renewable Energy Laboratory. Golden : National Renewable Energy Laboratory, 2009. p. 75, Technical report.

- James, Rhodri i Costa, Marc. 2015.** *Floating Offshore Wind: Market & Technology Review*. s.l., Escòcia : The Carbon Trust, juny / 2015.
- Médipôle Partenaires. 2015.** Médecine hyperbare. *Clinique Saint-Pierre*. [En línia] 2015. [Data: 19 / 11 / 2016.] <http://saint-pierre.medipole-partenaires.fr/medecine-hyperbare/>.
- Molins, Climent, et al. 2016.** Spar concrete monolithic design for offshore wind turbines. 2016.
- Murphy, J, et al. 2011.** *Site Selection Analysis for Offshore Combined Resource Projects in Europe*. 2011.
- National Mapping, Cadastre & Land Registry Authorities in Europe. 2016.** EuroGlobalMap. *EuroGeographics*. [En línia] Octubre / 2016. [Data: 16 / 11 / 2016.] <http://www.eurogeographics.org/products-and-services/euroglobalmap>.
- Ports de la Generalitat [1]. 2017.** Port de Palamós - Equipaments. *Ports de la Generalitat*. [En línia] 2017. [Data: 7 / 1 / 2017.] <http://www.portsgeneralitat.org/index.php/ca/ports/10-ports/229-port-de-palamos-equipaments.html>.
- Ports de la Generalitat [2]. 2017.** Port de Sant Carles de la Ràpita - Equipaments. *Ports de la Generalitat*. [En línia] 2017. [Data: 7 / 1 / 2017.] <http://www.portsgeneralitat.org/index.php/ca/ports/10-ports/16-port-de-sant-carles-de-la-rapita-equipaments.html>.
- Ports de la Generalitat [3]. 2017.** Port de Vilanova i la Geltrú - Equipaments. *Ports de la Generalitat*. [En línia] 2017. [Data: 7 / 1 / 2017.] <http://www.portsgeneralitat.org/index.php/ca/ports/10-ports/252-port-de-vilanova-equipaments.html>.
- REE. 2016.** Mapas de la red - Red Eléctrica de España. *Red Eléctrica de España*. [En línia] 1 / 2016. [Data: 16 / 11 / 2016.] <http://www.ree.es/es/actividades/gestor-de-la-red-y-transportista/mapas-de-la-red>.
- Samorani, M. 2013.** The Wind Farm Layout Optimization. [autor llibre] P. M. Pardalos et al. *Handbook of Wind Power Systems*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2013.
- SMC. 2017.** Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques. *Meteo.cat / Servei Meteorològic de Catalunya*. [En línia] 2 / febrer / 2017. [Data: 12 / març / 2017.] <http://www.meteo.cat/wpweb/climatologia/serveis-i-dades-climatiques/anuaris-de-dades-meteorologiques/xarxa-destacions-meteorologiques-automatiques/>.
- SSIBE. 2010.** Notícies - Ja tenim nova cambra hiperbàrica. *Serveis de Salut Integrats del Baix Empordà*. [En línia] 22 / 4 / 2010. [Data: 19 / 11 / 2016.] <http://www.ssibe.cat/index.php?noticia=867>.
- Suárez de Vivero, Juan L. 2011.** Atlas para la planificación espacial marítima. [En línia] 2011. [Data: 22 / novembre / 2016.] [http://www.marineplan.es/ES/ATLAS\\_13\\_06\\_11.pdf](http://www.marineplan.es/ES/ATLAS_13_06_11.pdf).
- TeleGeography. 2016.** Submarine Cable Map. [En línia] PriMetrica, Inc., 2016. [Data: 12 / 11 / 2016.] <http://www.submarinecablemap.com/>.
- Theobald, David M. 2001.** ArcUser Online - Understanding Topology and Shapefiles . *Esri*. [En línia] June / 2001. [Data: 22 / Gener / 2017.] <http://www.esri.com/news/arcuser/0401/topo.html>.

**Trubat, Pau. 2014.** Estudi dels sistemes d'amarratge per a plataformes flotants per a aerogeneradors. *Treball Final de Màster*. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

## Apèndix - Resum del tractament de dades

Tot seguit es descriu breument el procés de tractament dels mapes emprats en el càlcul dels emplaçaments. Es fa esment de les eines pertanyents al mòdul *ArcToolbox* que s'han fet servir durant el procés.

- El mapa de batimetria consta de dos fulls que es descarreguen en format ASCII. Per separat, s'han convertit a format ràster mitjançant l'eina *ASCII to ràster* de l'*ArcToolbox*. Els dos ràsters obtinguts cal després unir-los en un de sol, emprant l'eina *Mosaic*. Com que el mapa de vent és el que té menys zona amb dades, és el que determina la zona d'estudi i per tant servirà com a màscara per retallar el de batimetria, molt més extens; aquest retall s'ha fet amb l'opció *Extract by mask*. D'altra banda la resolució espacial del mapa de batimetria era superior als 200 m, de manera que calia adaptar-lo a aquesta xifra per garantir una millor compatibilitat amb la resta. Es va fer servir l'eina *Resample* per aquest pas. Finalment es va generar un nou mapa amb la batimetria reclassificada per puntuacions, és a dir, que amb l'eina *Reclassify* es substitueixen les dades de batimetria per la puntuació que se'ls assigni.
- La distància a la costa es va introduir al càlcul mitjançant la creació d'un mapa que inclogués com a variable la distància de cada píxel a la línia de la costa. L'eina *Euclidean distance* permet generar un mapa com aquest, però calcula la distància respecte cel·les aïllades d'un altre mapa ràster. En disposar-se d'un mapa vectorial amb la línia de la costa, es va fer una extracció per màscara (*Extract by mask*) de les cel·les d'un mapa ràster que quedaven adjacents a la línia vectorial; amb això es genera un mapa ràster a on hi apareixen les cel·les formant la línia de la costa. Amb aquest mapa ja es pot generar el de distàncies a la costa, amb l'extensió desitjada (la que té el mapa de vent, en aquest cas). Com a últim pas, s'ha reclassificat el mapa per obtenir-ne un amb els pesos atorgats.
- Quant als mapes de distància als ports i les cambres hiperbàriques, el mètode seguit va ser idèntic al del cas de la distància a la costa, excepte per què aquí els elements respecte dels que es vol calcular la distància són punts. Novament s'ha fet una extracció per màscara i hem generat dos mapes que inclouen, respectivament, les cel·les que queden a tocar dels punts del mapa vectorial que representen els ports i hospitals. Amb l'eina *Euclidean distance* s'han generat ambdós mapes i, finalment, s'han reclassificat amb les puntuacions adients.